

Aus dem Institut für Radiologie
Abteilung für Neuroradiologie
der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Dreidimensionale Darstellung der Hirnnerven V-VIII mittels virtueller Zisternoskopie

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät der Charité –
Universitätsmedizin Berlin

von
Christian Nicolaus Heine
aus Berlin

Dekane: Prof. Dr. Joachim W. Dudenhausen
Prof. Dr. med. Martin Paul

Gutachter: 1. PD Dr. med. R. Klingebiel
2. PD Dr. med. S. Mutze
3. PD Dr. med. M. Bollow

Datum der Promotion: 23.09.2004

Abstract (Deutsch)

Ein bezüglich Datenakquisition und Nachverarbeitung optimiertes Visualisierungsprotokoll zur dreidimensionalen Darstellung der Hirnnerven V-VIII im Bereich der basalen Zisternen wird vorgestellt. Auf der Basis von hochauflösenden MRT Daten und unter Verwendung der Volume-Rendering-Technik entstanden insgesamt 10 Standardansichten der genannten Hirnnerven, die deren vollständige und zeiteffektive intrazisternale Abbildung mit besonderer Beachtung pathophysiologisch relevanter Zonen ermöglichen. Das Protokoll zeigte in der Evaluation an Patienten mit neurovaskulären Konflikten und anderen neuralen Kompressionssyndromen im Bereich des Kleinhirnbrückenwinkels seine Eignung bezüglich Bildqualität und diagnostischer Wertigkeit. Probleme traten vor allem aufgrund von Pulsations- und Bewegungsartefakten im akquirierten MRT-Datensatz, sowie zu enger Zisternen auf der Höhe der virtuellen Kameraposition auf. Diese ließen sich in den meisten Fällen jedoch durch leichte Parametervariationen beheben. Zur genauen Identifikation der Gefäße und zur Vermeidung der Weitergabe von Fehlzuordnungen war zusätzlich zu den Rekonstruktionen die Betrachtung des Originaldatensatzes erforderlich. Die Nachverfolgung der mit dem beschriebenen Protokoll virtuell zisternoskopisch untersuchten Patienten ergab bei der weit überwiegenden Zahl der verfolgten Patienten Konsequenzen hinsichtlich Diagnose und/oder Therapie. Die Korrelation mit intraoperativen Befunden konnte nur bei zwei Patienten mit Akustikusneurinomen erfolgen, wobei hier eine Übereinstimmung festgestellt werden konnte. Ursache für die nur geringe Zahl der zur Verfügung stehenden intraoperativen Befunde ist die lange Latenz zwischen Bildgebung und neurochirurgischer Intervention bei neurovaskulären Konflikten. Zusammenfassend lässt sich feststellen dass die virtuelle Zisternoskopie nach dem vorgestellten Protokoll eine komplementäre Bildgebungstechnik ist, die wichtige räumliche Informationen zu neurovaskulären Interaktionen in den basalen Zisternen liefert. Weitere Untersuchungen, insbesondere die intraoperative Befundkorrelation, sind jedoch erforderlich.

Abstract (English)

The following thesis presents a protocol for the three-dimensional visualization of the cranial nerves V-VIII within the basal cisterns, being optimized with regard to data acquisition and postprocessing. Based on high resolution MRI datasets and using the volume rendering technique, 10 standardized views of the aforementioned cranial nerves were developed. Thus, the complete and time effective intracisternal depiction was intended to be made possible, focussing on pathophysiological important areas of the nerves. The protocol showed its suitability concerning image quality and diagnostic value in evaluation of patients with neurovascular conflicts or other neural compression syndromes in the cerebello-pontine angle. Problems mainly occurred as a result of pulsation and motion artefacts in the MR dataset and narrow cisterns in the level of the virtual camera position. In most cases they could be solved by slight variations of the postprocessing parameters. To guaranty the correct identification of the vessels and to avoid the risk of giving incorrectly assigned anatomic information to subsequent readers, the additional inspection of original dataset is necessary. In the follow up of the examined patients consequences in diagnosis and/or therapy were found in the most cases. The correlation of the virtual cisternoscopic images with the intraoperative results could only be performed in two patients with acoustic neuromas and was successful. The reason for the small amount of available intraoperative results is the latency between imaging and neurosurgical intervention in neurovascular conflicts. Concluding the virtual cisternoscopy following the introduced protocol is a complementary imaging technique that provides important spatial information about neurovascular interactions within the basal cisterns. Yet further investigations, especially the intraoperative correlation of the results, are necessary.

Deutsch:

Hirnnerven
virtuelle Zisternoskopie
MRT
3D Darstellung
basale Zisternen
neurovaskuläre Konflikte
Standardprotokoll

English:

cranial nerves
virtual cisternoscopy
MRI
3D imaging
basal cisterns
neurovascular conflict
standardized protocol

1	EINLEITUNG	8
1.1	Historischer Rückblick	8
1.2	Demonstration der Hirnnervenbildgebung mittels Computertomographie	9
1.3	Anatomie	11
1.4	Methoden der dreidimensionalen Datennachverarbeitung	12
1.5	Fragestellungen.....	17
2	MATERIAL UND METHODEN	18
2.1	Methodische Voruntersuchungen	18
2.1.1	Daten-Akquisition	18
2.1.2	Daten-Nachverarbeitung	19
2.2	Anwendungsstudien	20
2.2.1	Hauptstudie	20
2.2.2	Nachkontrollstudie.....	21
2.3	Gesamtkollektiv	21
3	ERGEBNISSE	23
3.1	Methodische Voruntersuchungen	23
3.1.1	Daten-Akquisition	23
3.1.2	Daten-Nachverarbeitung	25
3.2	Anwendungsstudien	31
3.2.1	Hauptstudie	31
3.2.2	Nachkontrollstudie.....	34
3.3	Gesamtkollektiv	35

4	DISKUSSION.....	38
4.1	Notwendigkeit der Darstellung der basalen Zisternen.....	38
4.2	Krankheitsbilder	38
4.3	Anforderungen an die Darstellung der basalen Zisternen	39
4.4	Methodische Voruntersuchungen.....	41
4.4.1	Die Datenakquisition	41
4.4.2	Die Nachverarbeitung.....	42
4.5	Anwendungsstudien	44
4.5.1	Die Hauptstudie	44
4.5.2	Nachkontrollstudie.....	45
4.6	Gesamtkollektiv	48
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	50
6	LITERATUR.....	53
7	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FACHAUSDRÜCKE.....	60
8	DANKSAGUNG.....	61

1 Einleitung

Die Fortschritte im Bereich der Datenakquisition mittels hochauflösender Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) während der letzten Jahre haben nicht nur die Abbildungsqualität verbessert, sondern waren auch mit einer steigenden Menge an auszuwertenden und zu archivierenden Daten verbunden. Die Notwendigkeit der effizienten Befundung, sowie die technischen Entwicklungen im Bereich der Computertechnologie und der Softwareapplikationen haben den Weg für neue Visualisierungstechniken geebnet. Die in dieser Arbeit beschriebene virtuelle Zisternoskopie basiert auf der Technik des Volume Rendering (VR), der jüngsten der zurzeit existenten Nachverarbeitungsroutinen im Bereich der dreidimensionalen (3D) Datennachverarbeitung. Diese bietet im Vergleich zu ihren Vorgängern, der Maximum Intensity Projektion (MIP), dem Surface Rendering (SR) und der multiplanaren Reformation (MPR), entscheidende Vorteile bezüglich Darstellungsqualität, Genauigkeit und Übersichtlichkeit.

1.1 Historischer Rückblick

Bis zum Beginn der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts war für die radiologische Diagnostik von Pathologien, insbesondere Tumoren des Kleinhirn-Brückenwinkels (KHBW) und der basalen Zisternen ein aufwendiges, invasives und für den Patienten unangenehmes Procedere notwendig. Neben verschiedenen mit Strahlenbelastung verbundenen Übersichts- und Spezialaufnahmen des Schädels, die indirekte Hinweise auf Raumforderungen geben sollten, spielte die Zisternographie eine wichtige Rolle. Mit Hilfe von intrathekalen Luft- oder Kontrastmittelinjektionen (Pantopaque) und durch spezifische Lagerungsmanöver wurde eine Negativ- bzw. Positivkontrastierung der Zisternen erreicht [1, 2]. Diese invasive und für den Patienten in einem Großteil der Fälle mit Kopfschmerzen und Übelkeit verbundene Maßnahme erlaubte in vielen Fällen Rückschlüsse auf Größe und unter Umständen auch auf die Art einer Raumforderung. Die Darstellung von Hirnnerven oder neurovaskulären Konflikten hingegen war nicht möglich.

In den 80er Jahren konnte die Bildgebung durch die Einführung der computertomographischen (CT) Zisternographie optimiert werden. Es boten sich erste Möglichkeiten, Hirnnerven darzustellen. Eine intrathekale Kontrastmittelinjektion (Metrizamid) war jedoch auch für diese Untersuchungsmethode notwendig [3].

Erst die Einführung der Magnetresonanztomographie ermöglichte es, unter Verzicht auf ionisierende Strahlen, die basalen Zisternen und die sie durchlaufenden Hirnnerven qualitativ hochwertig darzustellen [4]. Das anfängliche Problem der zu großen Schichtdicke (3-5 mm) lösten Casselman et al. [5] mit der 1993 vorgestellten 3DFT CISS Sequenz, einer stark T2-gewichteten Gradientenechosequenz, der bis heute die größte Effektivität in der intrazisternalen Darstellung der Hirnnerven und der Darstellung operativ verifizierter neurovaskulärer Konflikte zugesprochen wird [6, 7, 8, 9].

Die virtuelle Zisternoskopie (VZ) ist eine Form der virtuellen Endoskopie zur Darstellung der basalen Zisternen basierend auf dreidimensionalen (3D) MRT-Datensätze. Sie wurde erstmals 1998 beschrieben [10, 11, 12] und ermöglicht eine umfassende, nicht invasive Darstellung der intrazisternalen Strukturen und ihrer komplexen räumlichen Beziehungen zueinander in endoskopischer Sichtweise, ohne Einschränkungen durch operativ-technische Gegebenheiten. Als klinische Anwendungsbereiche sind vor allem die Visualisierung neurovaskulärer Konflikte (NVK) und die Bildgebung intrazisternaler Raumforderungen von Bedeutung.

1.2 Demonstration der Hirnnervenbildgebung mittels Computertomographie

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden, zum Vergleich mit den aktuellen Visualisierungsformen mittels MRT, auch alternative Darstellungsmöglichkeiten der Hirnnerven, basierend auf Schnittbildern der CT, betrachtet. Es wurden hierbei zwei historische Arten der zisternalen Kontrastgebung eingesetzt.

Die gezeigten Visualisierungen der Nn. trigemini entstanden im Rahmen einer zervikalen Myelographie, bei der es regelhaft zu einem Kontrastmittelübertritt in die basalen Zisternen kommt, sowie im Rahmen einer experimentellen CT-Untersuchung eines anatomischen Kopfpräparates. Die Kontrastverstärkung wurde zum einen durch ein jodhaltiges Kontrastmittel (Myelographie) und zum anderen durch Luft, die die Zisternen des Kopfpräparates ausfüllte erreicht.

Sowohl die Zisternographie mittels Luft als auch mittels jodhaltigem Kontrastmittel stellten ehemals in der klinisch-neuroradiologischen Routine etablierte Verfahren dar, deren Durchführung jedoch mit potenziellen Nebenwirkungen verbunden war [1, 2, 3, 13].

Mit beiden Methoden lassen sich gut die kräftigen fünften Hirnnerven darstellen. Das Schnittbild einer routinemäßig durchgeführten CT des Hirnstammes in der

gleichen Ebene hingegen zeigt, dass hier die natürliche Kontrastierung gegenüber dem umgebenden Liquor nicht ausreicht, um eine Aussage bezüglich der Hirnnerven machen zu können. Als Goldstandard gilt heute die Darstellung mittels MRT [5, 7, 8, 14, 15].

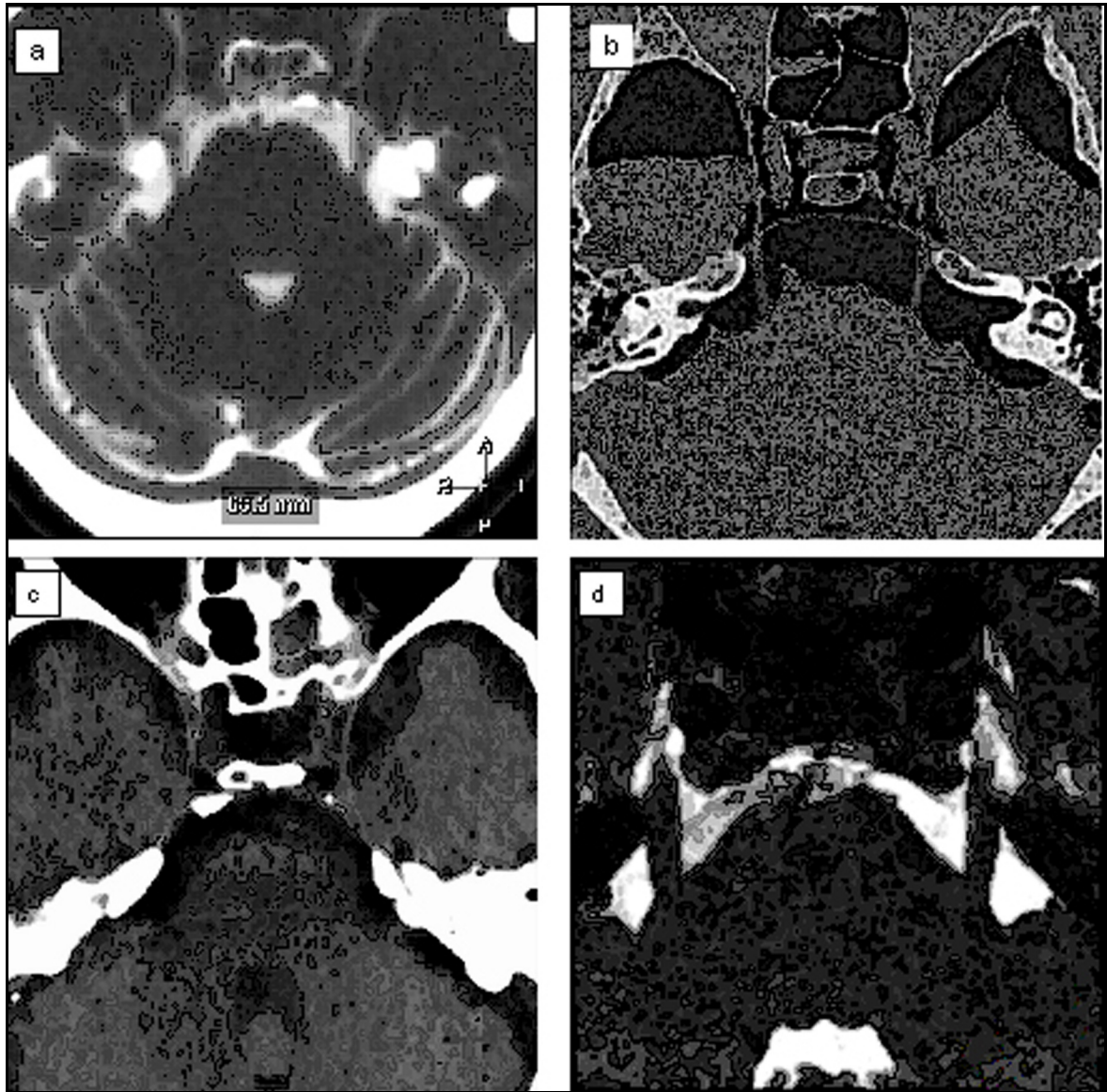


Abb. 1a-d: Axiale CT- und MRT-Schnitte auf Höhe der Nn. trigemini im Vergleich
a) zervikale Myelographie mittels jodhaltigem, nicht-ionischem Röntgenkontrastmittel (Isovist-300, Schering, Berlin), **b)** anatomisches Kopfpräparat im CT-Schnitt, **c)** CT des Hirnstamms ohne Kontrastmittel, **d)** 3DFT CISS MRT.

1.3 Anatomie

Die basalen Zisternen, die sich als erweiterter Liquorraum zwischen Hirnbasis und Schädelbasis vom Foramen magnum bis zur Crista galli am Vorderrand der vorderen Schädelgrube erstrecken, lassen sich in eine hintere und eine vordere Basalzisterne unterteilen. Die vordere Basalzisterne umfasst das Gebiet zwischen dem Dorsum sellae und dem Vorderrand der vorderen Schädelgrube. Die hintere Basalzisterne reicht vom Foramen magnum bis zum Dorsum sellae. Sie setzt sich zusammen aus der Cisterna pontocerebellaris, der Cisterna interpeduncularis und der Cisterna ambiens. Der Raum zwischen Kleinhirununterfläche und Medulla oblongata wird von der Cisterna cerebellomedullaris ausgefüllt.

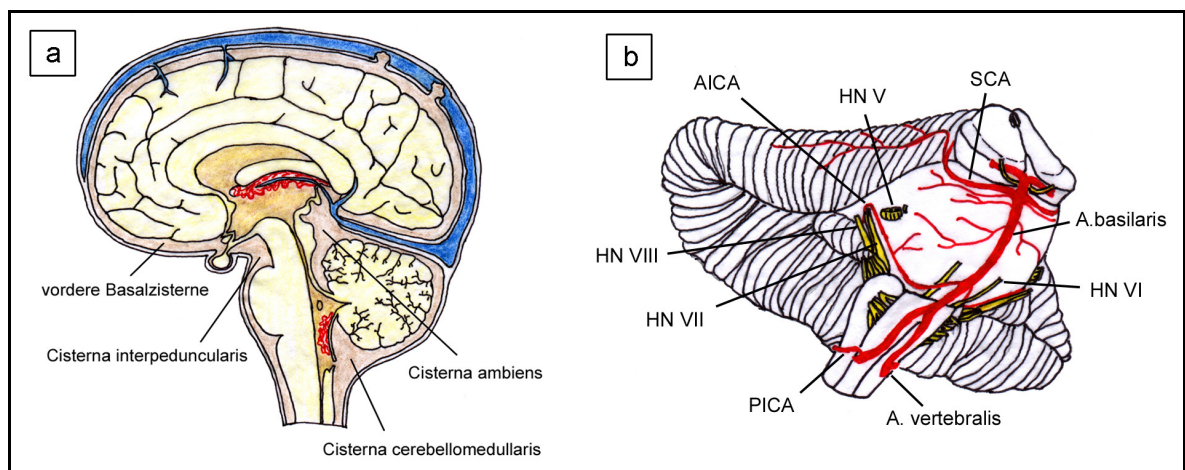


Abb. 2a-b: Anatomie der basalen Zisternen und Abgänge der Hirnnerven vom Hirnstamm
a) Liquorräume im Bereich des Hirnstamms und des Kleinhirns. Die Cisterna interpeduncularis, die Cisterna ambiens und die Cisterna pontocerebellaris (nicht abgebildet) bilden gemeinsam die hintere Basalzisterne. **b)** Hirnnervenabgänge der HN V-VIII und ihre Beziehungen zu den benachbarten Arterien. *Bildquellen: 2a) nach Netter, F., Atlas der Anatomie des Menschen, Stuttgart, New York: Thieme, 1997; 2b) nach Sobotta, J., Atlas der Anatomie des Menschen, München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg, 1993*

Die Hirnnerven (HN) V-VIII durchqueren in ihrem Verlauf die hintere Basalzisterne. Der N. trigeminus (HN V) verlässt den Hirnstamm seitlich des Pons und zieht von dort nach ventral durch den Porus nervi trigemini in die Cavitas trigeminalis, wo sich das Ganglion trigeminale befindet. Man kann im Verlauf des Nerven einen kräftigen sensiblen von einem kleineren motorischen Anteil unterscheiden. Der N. abducens (HN VI) tritt zwischen Pons und Medulla oblongata direkt oberhalb der Pyramide in die Zisternen ein. Von dort zieht er in ventro-rostraler Richtung zum Clivus, wo er durch die Dura mater hindurchtritt und im Bereich des Sinus cavernosus weiter verläuft. Der intrazisternale Verlauf der Nn. facialis (HN VII)

et vestibulocochlearis (HN VIII) erstreckt sich zwischen dem Kleinhirn-Brückenwinkel und dem Meatus acusticus internus. Dabei liegt der N. facialis (mit dem N. intermedius) etwas ventral des N. vestibulocochlearis.

Die Stelle des Eintritts bzw. des Austritts der Hirnnerven in bzw. aus dem Hirnstamm, genau genommen den Übergang zwischen zentralnervösem und peripherem Anteil der Nerven, bezeichnet man als Wurzeleintritts- (-austritts-) zone (WEZ). Wegen der fehlenden oder dünneren Markscheide ist dieser Bereich, vor allem der intrazisternale zentralnervöse Anteil der Hirnnerven, besonders empfindlich für neurovaskuläre Affektionen [16].

Pathophysiologisch relevante Arterien der Region sind die Aa. vertebrales und davon abgehend die A. inferior posterior cerebelli (PICA), sowie die A. basilaris mit ihren Abgängen, der A. inferior anterior cerebelli (AICA) und der A. superior cerebelli (SCA). Als Vene ist die V. petrosa, die anterolateral unter dem N. trigeminus verläuft, um dann in den Sinus petrosus superior zu münden, pathophysiologisch von Bedeutung.

1.4 Methoden der dreidimensionalen Datennachverarbeitung

Grundlagen

Grundsätzlich ist jeder dreidimensionale Datensatz, im vorliegenden Fall der MRT-Datensatz, aus kleinsten Volumen-Elementen, so genannten „Voxeln“ aufgebaut. Diese Voxel sind kleine Quader, deren Kantenlänge durch die Auflösung und Schichtdicke des Datensatzes und deren Signalintensität durch die Magnetresonanz-Eigenschaften des gescannten Gewebes bestimmt werden. Haben diese Voxel in allen drei Raumrichtungen die gleiche Ausdehnung, so bezeichnet man sie als isotrop. Die Aufstapelung dieser kleinen Quader im dreidimensionalen Raum repräsentiert so das gesamte Untersuchungsvolumen.

Zweidimensionale (2D) digitale Bilder dagegen bestehen aus Picture Elements (Pixel), deren Kantenlänge analog zu den Voxeln durch die Auflösung bestimmt wird. Der Unterschied zu den Voxeln besteht in der Zweidimensionalität, Pixel sind in einer Ebene angeordnet.

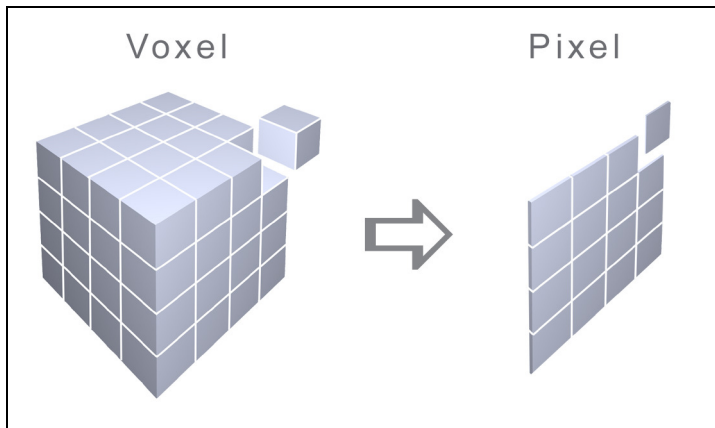


Abb. 3: Aufbau digitaler 3D Volumina aus Voxeln und 2D Bilder aus Pixeln

Abbildungen auf den üblichen Ausgabemedien, Röntgenfilme oder Bildschirme, bestehen immer aus einer Summe von 2D Bildpunkten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Informationen eines 3D Datensatzes so nachzuverarbeiten, dass sie auf eine Ebene projizierbar sind. Einer Vielzahl von Voxeln mit ihren unterschiedlichen Signalintensitäten muss also ein entsprechendes Pixel mit einer bestimmten Signalintensität bzw. Farbe zugeordnet werden. Unweigerlich geht diese Projektion mit einem Verlust an Information einher. Es ist also von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Nachverarbeitung, möglichst viele für die Befundung relevante Informationen zu vermitteln und unwichtige Informationen zu unterdrücken. Die nachfolgend beschriebenen vier gängigen Nachverarbeitungsmethoden gehen dabei von ganz unterschiedlichen Ansätzen aus.

Multiplanare Reformation (MPR)

Eine Abbildung von bis zu 100 % der Untersuchungsdaten ist unter Verwendung der MPR möglich. Das Verfahren besteht darin, Schnittebenen durch das Untersuchungsvolumen zu legen und die jeweils angeschnittenen Voxel als Pixel abzubilden. Dabei können die Ebenen prinzipiell in ihrer Lage im Raum frei gewählt werden. Das Volumen kann durch eine Vielzahl paralleler Schnittebenen komplett in Scheiben geschnitten werden. Wenn die Scheiben nicht dicker als die Ausmaße eines Voxels in der entsprechenden Ebene sind, wird die gesamte Information des Ausgangsdatsatzes übermittelt. Nachteile dieser gebräuchlichsten Nachverarbeitungsmethode sind die Vielzahl auszuwertender Schichten und die hohen Anforderungen an das räumlichen Vorstellungsvermögen des befundenden Arztes.

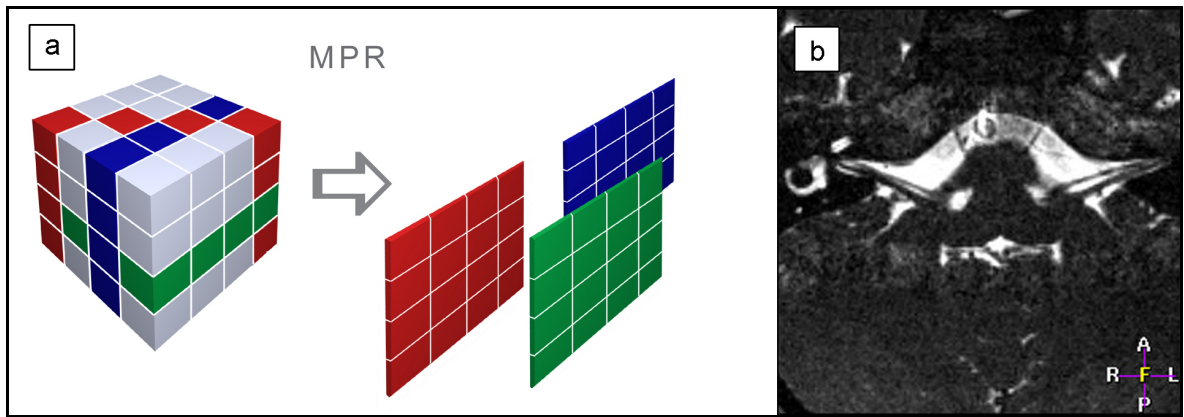


Abb. 4a-b: Prinzip der multiplanaren Reformation und Beispiel
a) Schnittebenen können in jeder beliebigen Raumrichtung durch das Untersuchungsvolumen gelegt werden, den dabei angeschnittenen Voxeln wird je ein Pixel des Schnittbildes zugeordnet **b)** Beispiel: MPR, axialer Schnitt auf Höhe der Nn. facialis et vestibulocochlearis

Maximum Intensity Projection (MIP)

Die MIP basiert auf einer Funktion, die das Untersuchungsvolumen von nur einer Seite aus betrachtet und aus jeder Reihe von Voxeln nur das bzw. die mit der höchsten Signalintensität herausfiltert. Das die Reihe von Voxeln repräsentierende Pixel bekommt genau diese Intensität zugewiesen. Mit diesem Verfahren lässt sich z.B. die Kontinuität des Labyrinthes, deren Beurteilung sonst sehr schwierig wäre und viele Schnittbilder erfordern würde, übersichtlich auf nur wenigen Abbildungen darstellen.

Die Voraussetzung für die MIP ist eine Datenakquisition, bei der die interessierende Struktur die größte Intensität erreicht oder eine vorbereitende Selektion des nachzuverarbeitenden Subvolumens.

Schwierigkeiten bei der Befundung von MIP-Rekonstruktionen können dadurch auftreten, dass keinerlei Tiefeninformationen weitergegeben werden. Strukturen mit hoher Intensität, die hintereinander liegen, verschmelzen so miteinander. Die Beurteilung erfordert daher sowohl mehrere Rekonstruktionen aus verschiedenen Blickrichtungen als auch profunde anatomische Kenntnisse des Untersuchungsgebietes, um die richtige räumliche Zuordnung der Strukturen zu gewährleisten.

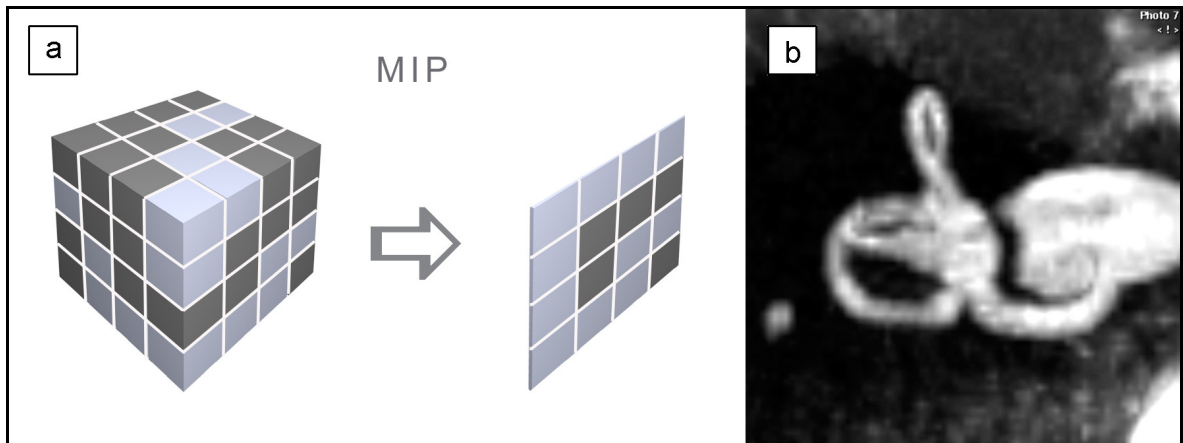


Abb. 5a-b: Prinzip der Maximum Intensity Projection und Beispiel
a) Bei Betrachtung des Untersuchungsvolumens von rechts ergibt sich die dargestellte MIP-Rekonstruktion. Zusammenhängende Strukturen mit hoher Signalintensität (hell) stellen sich als solche dar, über ihren Verlauf in der räumlichen Tiefe oder Kontaktpunkte mit räumlich dahinter liegenden Strukturen liefert eine einzige MIP-Rekonstruktion keinen Aufschluss. **b)** Beispiel: MIP des Labyrinthes

Surface Rendering (SR) und Volume Rendering (VR)

Einen besseren räumlichen Eindruck der dargestellten Strukturen bieten die beiden Verfahren Surface Rendering und Volume Rendering. Die Unterschiede liegen in der Auswahl der dargestellten Bildinformationen. Beim SR wird aus jeder Reihe von Voxeln immer nur das dem Betrachter Nächstgelegene selektiert, dessen Signal innerhalb eines vorher festgelegten Intensitätsbereiches liegt. Aus den selektierten Voxeln wird ein Netz aus Polygonen berechnet, das dann eine Oberfläche bzw. Grenzschicht abbilden kann. Die restlichen Voxel, ca. 90%, [17] werden nicht mit in die Berechnung einbezogen. Mit dieser Methode, lassen sich z.B. Knochenoberflächen gut darstellen. Zur realistischen Abbildung der Oberflächen kommt das so genannte Shaded Surface Display (SSD), eine Technik zur Oberflächenschattierung zur Anwendung.

Das Volume Rendering bezieht im Gegensatz zum SR alle Datensatzinformationen in die Rekonstruktion mit ein. Zwar wird auch bei diesem Verfahren eine schwellenwertabhängige Selektion vorgenommen, doch werden hier die Voxel jenseits eines Schwellenwertes lediglich als durchsichtig dargestellt. Sie stehen bei einer Schwellenwertänderung jederzeit wieder zur Verfügung. Es wird somit nicht wie beim SR eine Oberfläche berechnet und die restlichen Daten verworfen, sondern sämtliche Voxel des Untersuchungsvolumens werden in sichtbare und nicht sichtbare eingeteilt.

Durch diese Einteilung entstehen anstelle der nicht sichtbaren Voxel „Hohlräume“, durch die eine virtuelle Kamera navigiert werden kann. Ein räumlicher Eindruck entsteht durch perspektivische Darstellung (Nahe der Kamera liegende Objekte werden größer dargestellt als weiter entfernt liegende Objekte gleicher Größe.) und das so genannte Depth Cueing (= perspektivischer Lichtabfall: Je weiter ein Objekt von der Kamera entfernt ist, desto dunkler wird es dargestellt.). Bei geeigneten Datensätzen, kann den Voxeln entsprechend ihrer Intensität im Untersuchungsvolumen auch ein unterschiedlich abgestufter Grad an Transparenz zugeordnet werden. Zur Darstellung nicht transparenter Oberflächen kann auch beim VR das SSD angewendet werden.

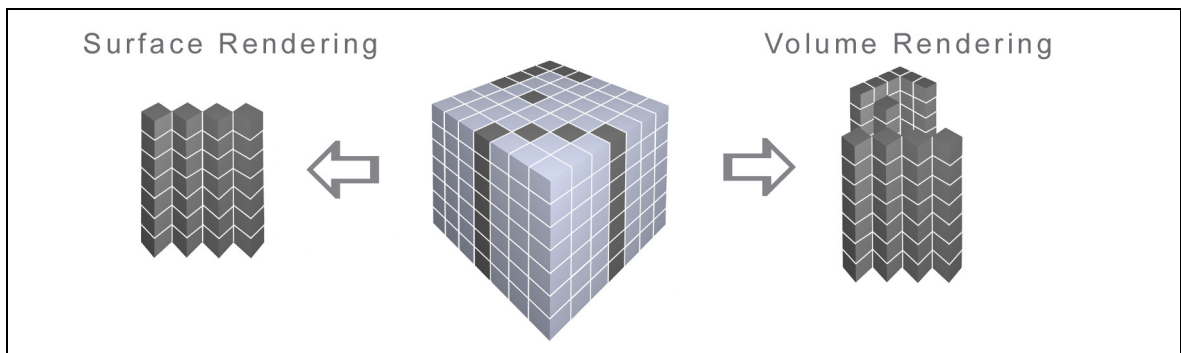


Abb. 6: Prinzipien des Surface Rendering und des Volume Rendering
Die Betrachtung des Untersuchungsvolumens von vorn und die Definition der hellen Voxel als transparent führen zu den gezeigten SR- bzw. VR-Rekonstruktionen. Beide Verfahren bieten eine realistische dreidimensionale Darstellung von Oberflächen, beim VR wird jedoch auch der hinter der ersten Oberfläche liegende Datensatz mit in die Rekonstruktion einbezogen.

Der Nachteil schwellenwertbasierter Nachverarbeitung liegt in der Untersucherabhängigkeit. Je nach Definition des Schwellenwertes können die dargestellten Strukturen in ihrer Größe und Form variieren oder gar nicht visualisiert werden.

Die daraus resultierende Untersucherabhängigkeit lässt sich nur mit Hilfe eines standardisierten Nachverarbeitungsprotokolls reduzieren, in dem Schwellenwerte und darzustellende Strukturen, z.B. durch definierte Standardansichten, vorgegeben sind.

1.5 Fragestellungen

Die Qualität der 3D Visualisierung und somit die diagnostische Wertigkeit der virtuell-endoskopischen Bildgebung hängt von der Ortsauflösung der Primärdaten und von den verwendeten Rekonstruktionsalgorithmen ab. Die Eignung eines Visualisierungsprotokolls für den Einsatz in der Bildgebungsroutine wiederum wird bestimmt von der Komplexität und Zeitdauer der Datenakquisition und -nachverarbeitung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte zunächst ein hochauflösendes MRT-Datenakquisitions(DA)-Protokoll definiert werden, das eine 3D Auflösung im Submillimeter-Bereich bietet, ohne Messzeiten zu überschreiten, wie sie in der neuro-radiologischen Routinebildgebung üblich sind. Basierend auf den resultierenden Datensätzen sollte unter Einbeziehung einer größtmöglichen Menge an Bilddaten ein standardisiertes Nachverarbeitungs(NV)-Protokoll entwickelt werden, das die dreidimensionale Darstellung pathoanatomisch wichtiger Details der Hirnnerven V–VIII in ihrem intrazisternalen Verlauf ermöglicht.

Das standardisierte virtuell-zisternoskopische NV-Protokoll sollte anschließend bei Patienten mit Verdacht auf ein zisternales neurales Kompressionssyndrom oder andersartige zisternale Pathologien mit Hirnnervenbeteiligung bezüglich seiner Bildqualität und Eignung für die Bildgebungsroutine evaluiert werden.

2 Material und Methoden

2.1 Methodische Voruntersuchungen

2.1.1 Daten-Akquisition

Die Primärdatensätze für das virtuell-zisternoskopische Bildgebungsprotokoll sollten folgenden Anforderungen genügen:

- Differenzierbarkeit der Nn. vestibularis superior/ inferior, cochlearis und facialis im Meatus acusticus internus (MAI),
- vollständige Abbildung des intrazisternalen Verlaufs der HN V-VIII,
- überlagerungsfreie Abbildung der Wurzeleintrittszonen der HN V-VIII,
- Isotropie der Voxel,
- Eignung zum Einsatz in der klinischen Routinebildgebung mit einer Dauer der Messzeit unter 15 min.

Die erstmals 1993 von Casselman et al. vorgestellte stark T2-gewichtete Gradientenechosequenz 3DFT (dreidimensionale Fourier Transformation) CISS (constructive interference in steady state)[5] wurde als methodische Grundlage der Voruntersuchungen gewählt. Die Untersuchungen wurden mittels Kopfspule in einem 1,5 Tesla MR Scanner (Magnetom Vision, Siemens, Erlangen) durchgeführt. Folgende Parameter wurden verwendet: TR 12,3 ms, TE 5,9 ms, Flipwinkel 70°, Anzahl der Akquisitionen 1, Field of view (FOV) 130 mm, Scanlänge 32 mm.

Bei insgesamt 6 Probanden, die weder klinisch noch anamnestisch Zeichen einer Hirnnervenaffektion aufwiesen, wurden die Parameter der Datenakquisition systematisch jeweils einzeln wie folgt variiert:

Schichtdicke	1,0	0,75	0,5 mm,
Matrix	512 ²	256 ²	128 ² Pixel,
Phasen-Oversampling	100%	75%	50%,
Ausleserichtung	post. → ant		rechts → links.

Anschließend wurde im Rahmen einer Konsensusbewertung durch zwei erfahrene Neuroradiologen die Sequenz definiert, die sowohl in den primären Schnittbilddatensätzen als auch in den abgeleiteten zwei- und dreidimensionalen Rekonstruktionen der basalen Zisternen die höchste Bildqualität ermöglichte.

2.1.2 Daten-Nachverarbeitung

Die Hirnnerven V-VIII und die sie umgebenden Gefäßstrukturen sollten unter Einbeziehung einer größtmöglichen Menge an Bilddaten mit möglichst wenigen standardisierten virtuell-zisternoskopischen Abbildungen in ihrem intrazisternalen Verlauf vollständig und weitestgehend überlagerungsfrei dargestellt werden. Als kritische Bildelemente wurden die folgenden pathophysiologisch bedeutsamen potenziellen neurovaskulären Kontaktpunkte definiert:

- Wurzeleintrittszone (WEZ) des N. trigeminus am Pons,
- Kleinhirn-Brückenwinkel mit den WEZ der Nn. facialis et vestibulocochlearis,
- Eintritt der Nn. facialis et vestibulocochlearis in den Meatus acusticus internus,
- WEZ des N. abducens.

Die Primärdatensätze wurden über interne Netzwerkverbindungen im DICOM-Format auf eine Workstation (Ultra 60 Computer, Sun Microsystems, USA) mit einem Software-Modul für Volume Rendering incl. endoluminaler Navigationsoption (Easy Vision 4.1, Philips, Holland) übertragen.

Die hochauflösenden Datensätze wurden eingesetzt, um mittels Volume Rendering virtuell-zisternoskopische Ansichten der basalen Zisternen und des inneren Gehörgangs (MAI) zu erzeugen, wobei folgende Parameter variiert wurden:

- Oberer Schwellenwert,
- perspektivischer Abfall der Lichtintensität (Depth Cueing),
- Position und Blickrichtung der virtuellen Kamera,
- Perspektivischer Blickwinkel,
- Farbkodierung,
- Matrix.

Die Rekonstruktionen wurden abschließend im DICOM-Format auf der Workstation und im JPG-Format auf einer CD-Rom gespeichert. Zusätzliche Farbkodierungen klinisch relevanter Strukturen wurden im Einzelfall, unter Nutzung eines Softwaremoduls zur digitalen Bildnachverarbeitung (Adobe Photoshop 6.0, Adobe Systems Inc., USA), auf einem handelsüblichen Windows PC durchgeführt.

2.2 Anwendungsstudien

Die Anwendungsstudien untergliederten sich nach den untersuchten Fragestellungen in eine Hauptstudie und eine Nachkontrollstudie.

Die Hauptstudie umfasste die Erprobung der Eignung des Nachverarbeitungsprotokolls für die Routinediagnostik und die Evaluierung der Qualität und diagnostischen Wertigkeit der virtuell-zisternoskopischen Rekonstruktionen. Die Nachkontrollstudie hatte die Überprüfung der klinischen Akzeptanz der standardisierten Nachverarbeitung zum Ziel.

2.2.1 Hauptstudie

Das in den Voruntersuchungen standardisierte Datenakquisitions(DA)- und Nachverarbeitungs(NV)-Protokoll wurde zur bildgebenden Diagnostik bei 14 Patienten (8 weibliche, 6 männliche, Alter: 3-87 Jahre, Durchschnittsalter: 49,4 Jahre) mit den nachstehend aufgeführten klinischen Verdachtsdiagnosen eingesetzt, die in den axialen Schnittbildern Zeichen eines neuralen Kompressionssyndroms aufwiesen: Trigeminusneuralgie (n=5), Facialisparesie (n=1), Hemispasmus facialis (n=1), Vertigo und/oder retrocochleäre Schallempfindungs-Schwerhörigkeit (n=6) und Zustand nach inkompletter Resektion eines KHBW-Tumors (Ependymom) (n=1).

Die Dauer der Datennachverarbeitung wurde mittels Stoppuhr erfasst. Jede der standardisierten Ansichten der virtuellen Zisternoskopie wurde bezüglich Bildqualität durch Konsensusbewertung zweier erfahrener Neuroradiologen unter Verwendung eines 5-teiligen Scores (1= unzureichend, 5= sehr gut) eingestuft. Nach dem selben Score wurde die diagnostische Wertigkeit der virtuell-zisternoskopischen Untersuchung insgesamt beurteilt. Die VZ Darstellung wurde als erfolgreich bewertet, wenn die durchschnittliche Bildqualität größer als 3 und die diagnostische Wertigkeit mindestens 3 betrug. Bewertet wurden jeweils nur die Standardansich-

ten des von der Pathologie betroffenen Hirnnerven, auch wenn Rekonstruktionen zusätzlicher HN beider Seiten zum Zweck der Zeitmessung erstellt wurden.

2.2.2 Nachkontrollstudie

Die Nachkontrollstudie umfasst insgesamt 29 Patienten (14 weibliche, 15 männliche, Alter: 3-87 Jahre, Durchschnittsalter: 52,9 Jahre) bei denen sowohl das DA- als auch das NV-Protokoll angewendet und dabei der Befund eines neurovaskulären Konfliktes eines oder mehrerer der Hirnnerven V-VIII (n=23) bzw. eines neuralen Kompressionssyndroms anderer Genese (n=6) erhoben wurde. Alle Patienten der Hauptstudie wurden auch in die Nachkontrollstudie aufgenommen.

Es wurden die im Anschluss an die poliklinische oder stationäre Behandlung erstellten Arztbriefe, die Akten der Poliklinik oder soweit verfügbar OP-Berichte ausgewertet. Wo dies nicht möglich war, wurde zu den ambulant betreuenden Fachärzten Kontakt aufgenommen.

Ziel der Nachkontrollstudie war es, zu prüfen, ob die bildgebend erhobenen Befunde eines neurovaskulären Konfliktes bzw. eines neuralen Kompressionssyndroms anderer Genese in die klinische Diagnose/Differentialdiagnose und Therapie Eingang gefunden haben und ob die Bildgebung mit dem intraoperativen Befund übereinstimmt.

2.3 **Gesamtkollektiv**

Die in die Studien aufgenommenen Patienten entstammten einem Kollektiv von 56 Patienten (29 weibliche, 27 männliche, Alter: 3-87 Jahre, Durchschnittsalter: 49,4 Jahre), die im Zeitraum von Januar 2000 bis Juni 2003 aufgrund des Verdachts eines neurovaskulären Konfliktes (NVK) der Hirnnerven V-VIII mittels des Standardakquisitionsprotokolls (3DFT CISS Sequenz) untersucht wurden oder bei denen sich aus den axialen Schnittbildern einer CISS- Sequenz der Verdacht eines neuralen Kompressionssyndroms ergab. In die Anwendungsstudien wurden vor allem Patienten mit schwierigen und unübersichtlichen pathoanatomischen Verhältnissen aufgenommen, bei denen eine 3D-Nachverarbeitung mittels virtueller Zisternoskopie weitere Befundinformationen versprach. Die klinischen Zuweisungsdiagnosen im Gesamtkollektiv verteilten sich wie in Abb. 7 gezeigt.

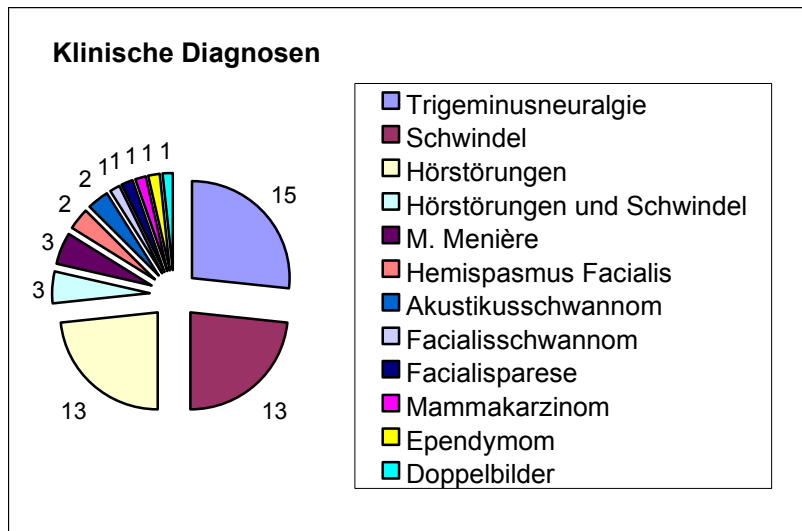


Abb. 7: Anzahl und Verteilung der klinischen Zuweisungsdiagnosen im Gesamtkollektiv

3 Ergebnisse

3.1 Methodische Voruntersuchungen

3.1.1 Daten-Akquisition

Bei den Voruntersuchungen zur Datenakquisition zeigte sich, dass das vom MR Scanner errechnete Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei den Schnittbildern des CISS-Datensatzes mit 1 mm Schichtdicke mit 1,03 am höchsten war und mit abnehmender Schichtdicke bei 0,75 mm auf 0,9 und bei 0,5 mm auf 0,74 absank. Sowohl in der multiplanaren Reformation als auch in der 3D Rekonstruktion mittels VZ wiesen jedoch die Datensätze mit geringerer Schichtdicke eine höhere Bildqualität auf. Da aufgrund der komplizierten anatomischen und pathoanatomischen Verhältnisse in den basalen Zisternen Rekonstruktionen von großer Bedeutung sind, wurde die Schichtdicke von 0,5 mm als Parameter des Standardakquisitionsprotokolls definiert.

Während der anschließenden Messungen wurde die Bildmatrix variiert. Es zeigte sich, dass eine Bildmatrix von 128^2 Pixel im Gegensatz zu 256^2 Pixel zu erheblichen Qualitätsverschlechterungen bereits in den axialen Schnittbildern führte. Eine Variation der Bildmatrix auf 512^2 Pixel führte zu einer Überschreitung der als Obergrenze definierten Messzeit von 15 min, so dass eine Matrix von 256^2 Pixel in das Standardprotokoll aufgenommen wurde.

Zur Vermeidung von Einfaltungsartefakten bei einem vergleichsweise kleinen Messfeld (130 mm) wurde primär eine Oversampling-Rate von 100 % gewählt. Bei weiteren Messungen mit Reduktion auf 75% und 50% stellte sich jedoch heraus, dass mit der Wahl einer Oversampling-Rate von 50 % eine Verkürzung der Messzeit um 3:21 min auf 10:03 min erreicht werden konnte, ohne dass Einfaltungsartefakte die Bildqualität beeinträchtigten.

Abschließend wurde die Ausleserichtung des MRT-Signals, die Einfluss auf die Lage und den Verlauf von Pulsationsartefakten hat variiert. Bei einer Querauslesung (rechts → links) führte bereits eine geringe Schief Lagerung des Kopfes zu einer Überlagerung labyrinthärer Strukturen durch Pulsationsartefakte der Aa. carot. int.. Eine Auslesung in posterior-anteriorer Richtung zeigte dagegen eine reduzierte Bildqualität im Bereich des KHBW, ebenfalls aufgrund von Pulsationsartefakten. Da eine möglichst gute Darstellung des KHBW zur Beurteilung der

Wurzeleintrittszonen der Hirnnerven von entscheidender Bedeutung ist und darüber hinaus bei Patienten mit Schallempfindungs-Schwerhörigkeit auch die Beurteilung des Labyrinthes gewährleistet sein muss, wurde die Querauslesung ausgewählt und dabei auf eine möglichst horizontale Kopflagerung geachtet.

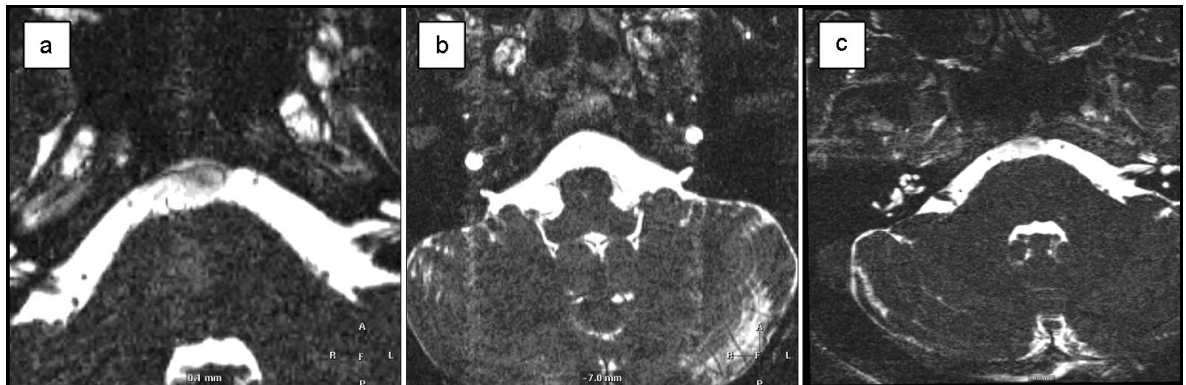


Abb. 8 a-c: Einfluss der Ausleserichtung auf Verlauf und Lage von Pulsationsartefakten
a) p→ a Auslesung mit Artefakten der A. basilaris, **b)** p→ a Auslesung mit Artefakten der Aa. carot. int. **c)** r→ l Auslesung: Bei horizontaler Kopfausrichtung tangiert das Artefaktband der Aa. carot. int. und basilaris weder den KHBW noch die labyrinthären Strukturen.

Aus den Ergebnissen der einzelnen Variationen ergab sich das Standardprotokoll für die Datenakquisition (Tab.1).

Tab. 1: Standardprotokoll der Datenakquisition mittels stark T2-gewichteter MRT

Parameter	TR ms	TE ms	Flip-winkel	FOV mm	SA	SD mm	Matrix Pixel	Voxel mm ³	Auslese-richtung	POS %	TA min
3DFT CISS	12,3	5,9	70°	130	64	0,5	256 ²	0,5 ³	R→l	50	10:03

TR: Repetitionszeit, TE: Echozeit, FOV: Field of View, SA: Anzahl der Schichten, SD: Schichtdicke, POS: Phasen-Oversampling, TA: Akquisitionszeit

Aus den Parametern FOV, Matrix und Schichtdicke ergab sich eine Voxelgröße von 0,5 x 0,5 x 0,5 mm³. Das Kriterium der Isotropie war damit erfüllt.

Das DA-Protokoll entspricht den gültigen „Richtlinien über Kriterien zur Qualitätsbeurteilung in der Kernspintomographie“ des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen[18].

3.1.2 Daten-Nachverarbeitung

Mit Verwendung des Volume Rendering war es möglich, unter Einbeziehung des gesamten Bilddatensatzes bildqualitativ hochwertige, virtuell-zisternoskopische 3D Ansichten der basalen Zisternen aller Probanden zu erstellen.

Methodische Einschränkungen ergaben sich durch Artefakte in den zugrunde liegenden MRT-Datensätzen, die vorwiegend auf Gefäßpulsationen (A. carotis interna, A. basilaris, A. vertebralis) zurückzuführen waren. Durch geringfügige Parametervariationen, vor allem des Schwellenwertes und des Depth Cueing, war es jedoch in den meisten Fällen möglich, diese zu kompensieren.

Entscheidend für eine hohe Bildqualität war die Wahl des oberen Schwellenwertes. Aus einem zu hoch gewählten Schwellenwert resultierten in der Rekonstruktion zahlreiche Artefakte, wohingegen ein zu niedrig gewählter Schwellenwert zu Kontinuitätsunterbrechungen der Nerven und Gefäße führte (Abb.9).

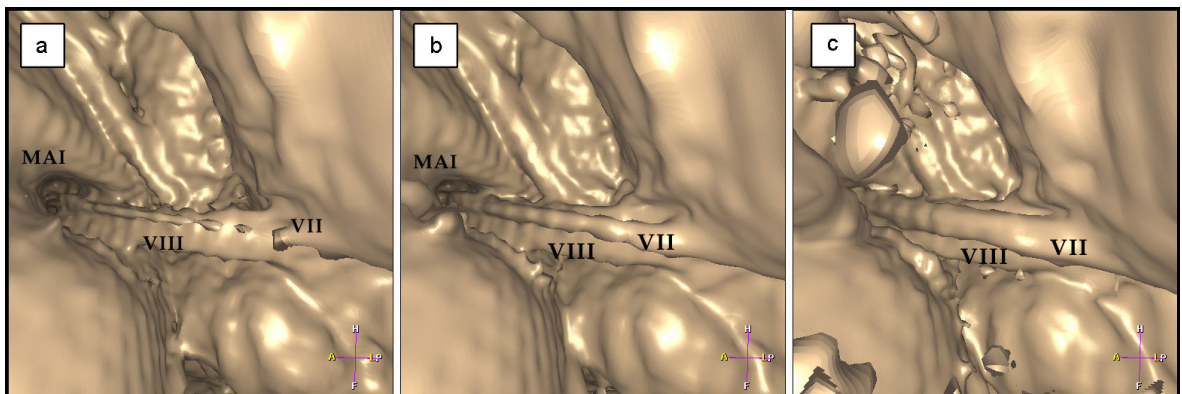


Abb. 9a-c: Einfluss des Schwellenwertes auf die Bildqualität der virtuellen Zisternoskopie
a) zu niedriger Schwellenwert (=350): Kontinuitätsunterbrechung des HN VII **b)** optimaler (=530) und **c)** zu hoher Schwellenwert (=750): Artefakte (z.B. oben links) täuschen Raumforderungen in der Zisterne vor

Die Einstellung des perspektivischen Abfalls der Lichtintensität (Depth Cueing) bietet die Möglichkeit, zum einen wichtige anatomische und pathoanatomische Strukturen im Bildvordergrund hervorzuheben und zum anderen Rekonstruktionsartefakte im Bildhintergrund zu dämpfen (Abb.10).

Das Depth Cueing in den Standardansichten wurde stets so gewählt, dass alle relevanten Strukturen, auch solche die sich im Hintergrund befanden, ausreichend ausgeleuchtet waren. Je nach Qualität der Ausgangsdatsätze wurden hier jedoch Variationen nötig. In diesen Fällen hatte die qualitativ hochwertige Darstellung der jeweiligen Hirnnerven im Vordergrund Priorität.

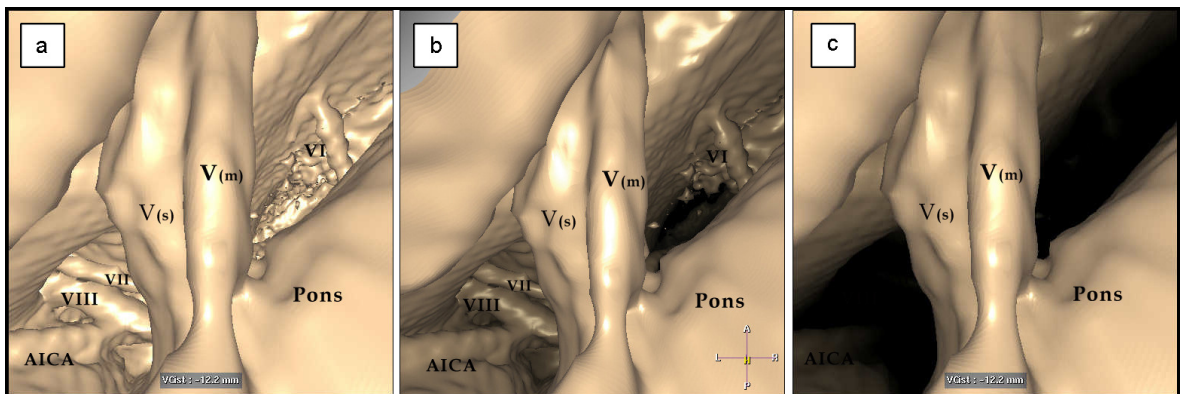


Abb. 10a-c: Einfluss des Depth Cueing auf die Bildqualität der virtuellen Zisternoskopie
a) Zu schwaches DC ($=10\%/cm$), Artefakte im Hintergrund verschlechtern die Abgrenzbarkeit der HN. **b)** Optimales DC ($=40\%/cm$). **c)** Zu starkes Depth Cueing ($=90\%/cm$), die benachbarten Strukturen im Bereich der Zisterne sind nicht beurteilbar.

Entsprechend der Zielsetzung wurden Kameraposition und Blickrichtung mittels intraluminaler Navigation so gewählt, dass jeder der Hirnnerven V-VIII möglichst überlagerungsfrei in seinem intrazisternalen Verlauf dargestellt werden konnte und seine WEZ aus verschiedenen Blickrichtungen möglichst vollständig einsehbar war (Abb. 11-13, Tab.2).

Für den N. trigeminus wurden insgesamt vier und für den N. abducens zwei Standardansichten entwickelt. Letzterer ließ sich, wegen seines geringen Kalibers, meist nicht von der WEZ an darstellen, sondern erst von seiner Ablösung vom Pons bis zur Schädelbasis. Aufgrund des parallelen Verlaufes und ihrer unmittelbaren Nachbarschaft wurden der N. facialis und der N. vestibulocochlearis gemeinsam in 4 standardisierten Ansichten dargestellt.

Die räumlich sehr engen Verhältnisse in den basalen Zisternen verlangen von einer intraluminalen Kamera einen möglichst weiten perspektivischen Blickwinkel, um auch aus relativ kurzer Distanz einen möglichst großen Anteil einer Struktur abbilden zu können. Mit steigendem Blickwinkel verringert sich allerdings die Größe von Strukturen im Bildhintergrund und damit deren Darstellbarkeit. Die verwendete Software bot vier verschiedene Blickwinkel von 30° bis 120° an. Als Standard wurde ein Winkel von 90° festgelegt, da dieser einen guten Überblick bei ausreichender Möglichkeit zur Darstellung der räumlichen Umgebung im Hintergrund bot.

Die Bildmatrix der Rekonstruktionen wurde mit 512^2 Pixel definiert, weil eine größere Matrix im Verhältnis zum benötigten Speicherplatz keine relevante Verbesse-

rung der Bildqualität mit sich brachte. Mit der Farbgebung wurde versucht, sich dem Bildeindruck neuroendoskopischer Fotografien anzunähern.

In Einzelfällen wurden einzelne Strukturen farblich nachkodiert.

Tab. 2: Verzeichnis der standardisierten virtuell-zisternoskopischen Ansichten der HN V–VIII mit den zugehörigen Rekonstruktionsparametern

HN	Abb. Nr.	Ansicht	Blick nach	Kameraposition	DC %/cm	PBw	Sch W	Kritische Elemente	Bild-
V	11a	von kranial	kaudal	lateral des Pons, rostral der WEZ	40	90°	530	WEZ, kranialer Anteil. Verlauf bis zur Schädelbasis	
V	11b	von kaudal	kranial	lateral des Pons, kaudal der WEZ	40	90°	530	WEZ, kaudaler Anteil. Verlauf bis zur Schädelbasis	
V	11c	von dorsal	antero-medial	lateral des Pons, dorsal des HN V	40	90°	530	WEZ, dorsaler Anteil. Verlauf bis zur Schädelbasis	
V	11d	von ventral	dorso-lateral	ventral des Pons, zwischen A. basilaris und HN V	30	90°	530	WEZ, ventraler Anteil. Verlauf bis zur Schädelbasis	
VI	12a	von lateral	medial	ventrolateral des Pons, zwischen KHBW und HN V	65	90°	530	intrazisternaler Verlauf	
VI	12b	von kaudal	kranial	ventro-kaudal der WEZ des HN VI	40	90°	530	WEZ, kaudaler Anteil	
VII	13a	von ventral	dorso-lateral	lateral des Pons, zwischen WEZ der HN VII/VIII und Vorderrand des Pons	40	90°	530	intrazisternaler Verlauf	
VII	13b	von medial	lateral	zwischen Pons und PAI	45	90°	530	N. VII/VIII, Verlauf im MAI	
VII/VIII	13c	von kranial	kaudo-medial	kraniolateraler Rand der peripontinen Zisterne	40	90°	530	WEZ, Nn. VII/III	
VII/VIII	13d	von kaudal	kranio-lateral	medialer Rand der peripontinen Zisterne, in Höhe des ponto-medullären Überganges	45	90°	530	Verlauf der Nn. VII/III zwischen Pons und Schädelbasis	

HN = Hirnnerv, DC = Depth Cueing, PBw = Perspektivischer Blickwinkel, SchW = Schwellenwert, WEZ = Wurzeleintrittszone, MAI = Meatus acusticus internus, PAI = Porus acusticus internus

Die hier abgebildeten Referenzbilder für die Standardansichten der virtuellen Zisternoskopie sind im Bereich der Nerven und Gefäße nachkoloriert, um dem Betrachter den erstmaligen Zugang zu dieser Methode zu erleichtern. In der Routinediagnostik war diese Nachbearbeitung dann nicht mehr nötig.

Zur Veranschaulichung und Orientierung ist zu jeder virtuell-zisternoskopischen Rekonstruktion eine zweidimensionale MPR (axial, sagittal oder coronar) mit Angabe der Kameraposition (rotes Dreieck) beigelegt.

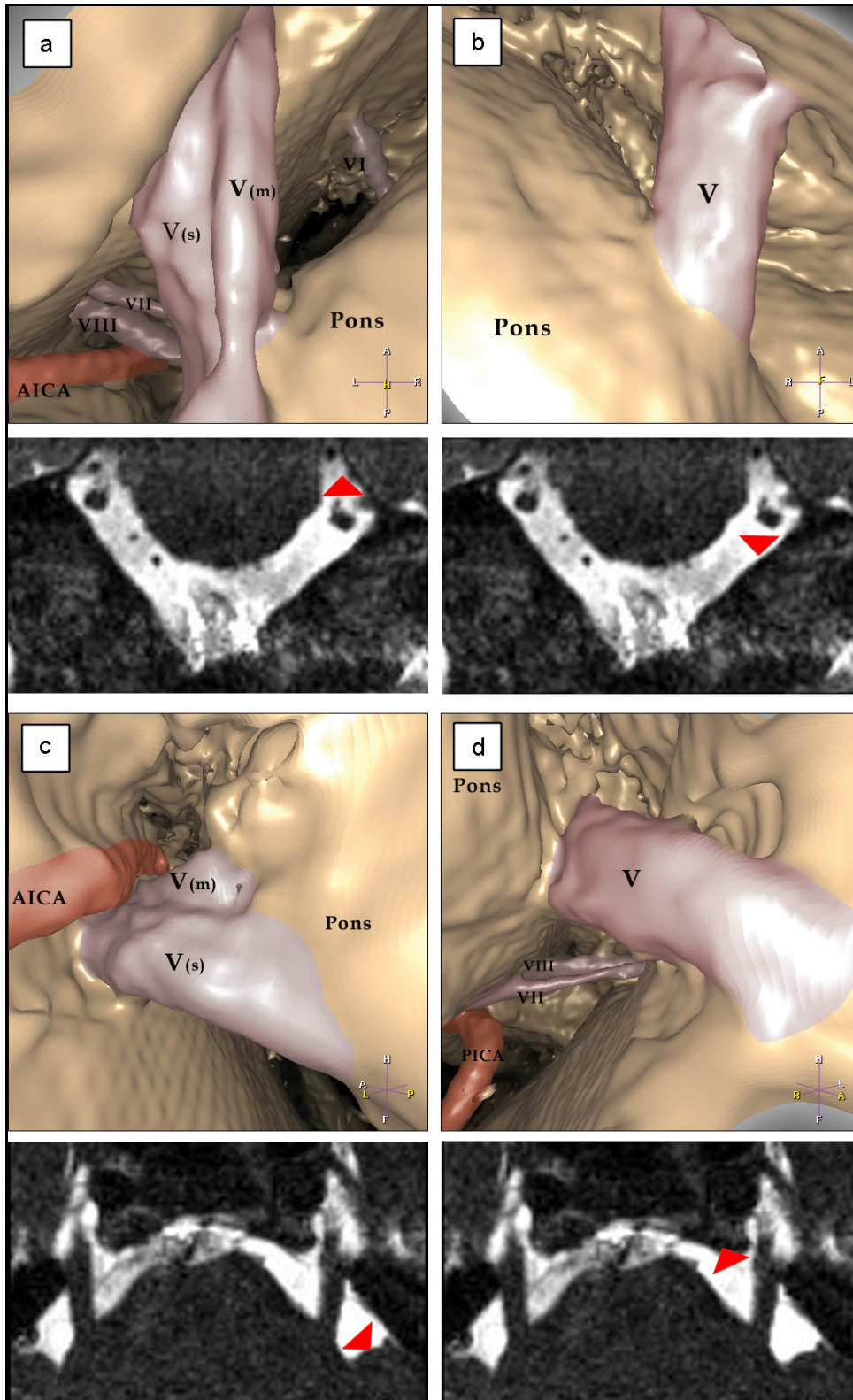


Abb. 11a-d: Virtuell-zisternoskopische Standardansichten des N. trigeminus

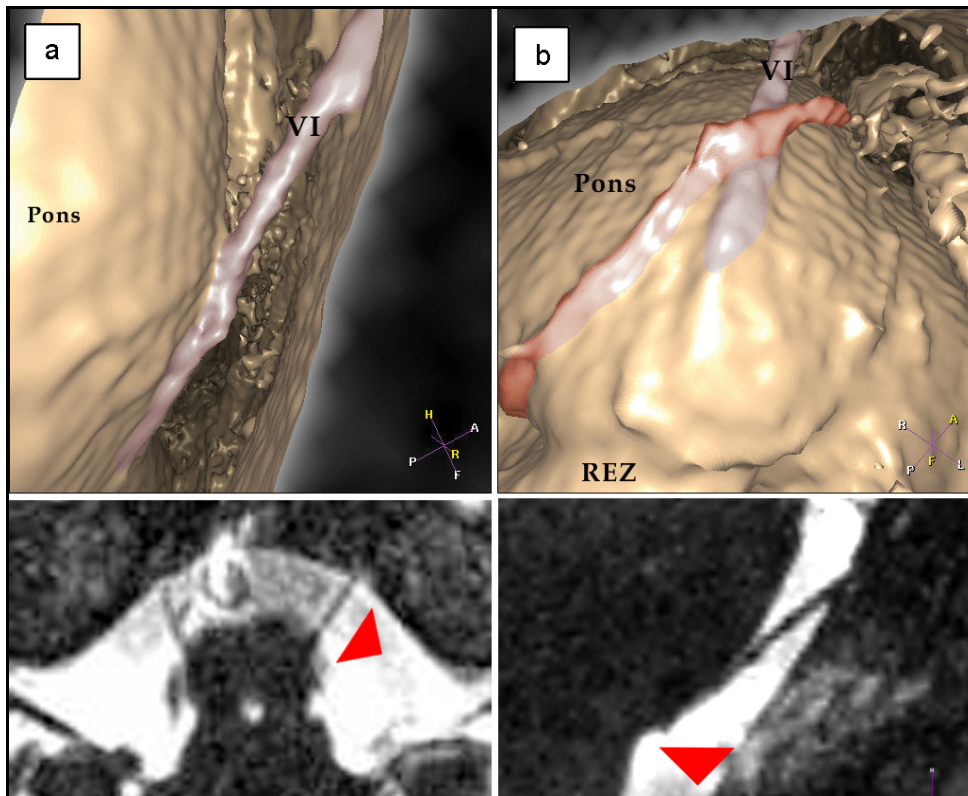


Abb. 12a-b: Virtuell-zisternoskopische Standardansichten des N. abducens

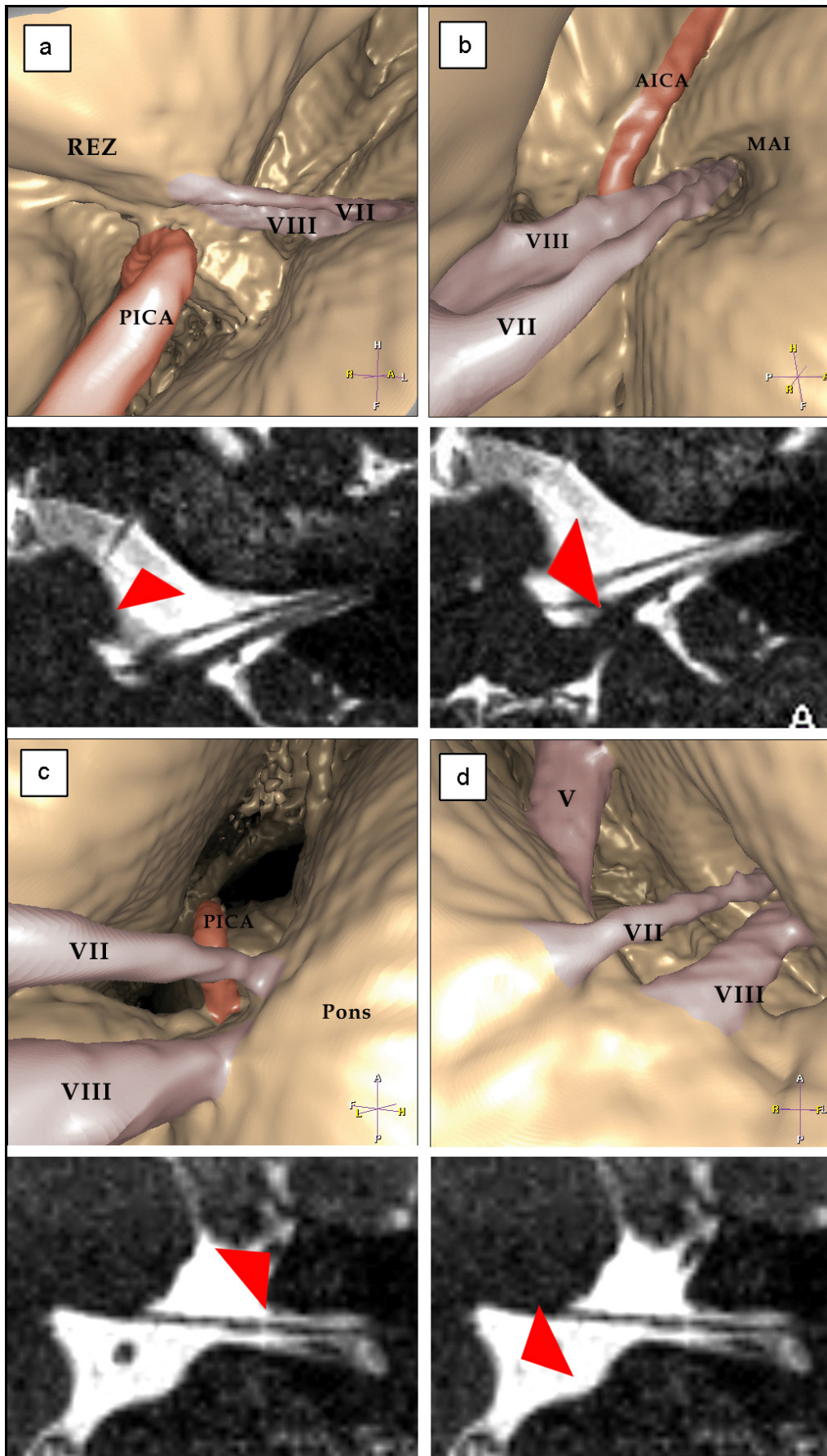


Abb. 13a-d: Virtuall-zisternoskopische Standardansichten der Nn. facialis und vestibulo-cochlearis

3.2 Anwendungsstudien

3.2.1 Hauptstudie

Die Bildgebung konnte mit Hilfe der virtuellen Zisternoskopie auf der Basis hochauflösender 3DFT-CISS -Datensätze bei 12 von 14 Patienten erfolgreich durchgeführt werden. Die restlichen 2/14 Patienten erfüllten nicht die Mindestkriterien bezüglich der Bildqualität und der diagnostischen Wertigkeit. Die mittlere Nachverarbeitungszeit betrug je Seite für den N. trigeminus $13,1 \pm 5,8$ min, für den N. abducens $5,6 \pm 1,3$ min und für die Nn. facialis et vestibulocochlearis zusammen $13,7 \pm 3,8$ min. Die Spanne der nötigen Nachverarbeitungszeiten reichte beim HN V von 7-32 min, beim HN VI von 6-8 min und bei den HN VII/VIII von 9-44 min. Die deutlich verlängerte Nachverarbeitungszeit bei den HN V und VII/VIII wurde bei zwei Patienten benötigt, bei denen die virtuelle Zisternoskopie später insgesamt nicht als erfolgreich bewertet werden konnte.

Bei vier Patienten musste eine Kameraposition variiert werden, um eine adäquate Darstellung der kritischen Bildelemente zu gewährleisten. Rekonstruktionsprobleme ergaben sich durch einen zu geringen Tiefendurchmesser der Zisterne auf der Höhe der Standardkameraposition bzw. durch Pulsationsartefakte der umliegenden Arterien (A. carotis int., A. basilaris, A. vertebralis) und durch Bewegungsartefakte. Die Probleme konnten größtenteils durch Variation folgender Parameter kompensiert werden: Absenkung des Schwellenwertes, Anhebung des Depth Cueing, Änderung von Kameraposition bzw. perspektivischem Blickwinkel.

Bei 2 Patienten musste das Protokoll um eine bzw. zwei Ansichten verkürzt werden, weil größere Raumforderungen keine entsprechende Kamerapositionierung zuließen.

Die Bewertung der Bildqualität durch zwei Neuroradiologen ergab einen durchschnittlichen Score von $4,2 \pm 0,8$. Bei der Evaluation der diagnostischen Wertigkeit, bezogen auf die gesamte VZ-Bildgebung des betroffenen Nerven, wurden im Durchschnitt $4,1 \pm 0,8$ Punkte erreicht (Tab. 3). Die Anforderungen an eine erfolgreiche VZ-Darstellung (Bildqualität >3 , diagnostische Wertigkeit ≥ 3) konnten in 2/14 Fällen nicht erfüllt werden.

Obwohl die virtuell-zisternoskopischen Bilder das räumliche Verständnis neurovaskulärer Beziehungen vertieften, waren für die sichere anatomische Zuordnung der dargestellten tubulären Strukturen die primären Schnittbilder und die daraus abgeleiteten multiplanaren Reformationen unentbehrlich. Basierend auf den axia-

len 2D und den rekonstruierten 3D Daten, sowie den klinischen Angaben, war die Erhebung einer radiologischen Diagnose bei 10 von 12 Patienten möglich. In 2 von 12 Fällen konnte lediglich eine Verdachtsdiagnose formuliert werden. Unter Einbeziehung von Bildgebung, Anamnese und klinischen Untersuchungsergebnissen wurden Kompressionssyndrome vaskulärer Genese bei 9 Patienten und neurale Kompressionssyndrome anderer Genese bei 3 Patienten diagnostiziert.

Tab. 3: Evaluation der Bildqualität und diagnostischen Wertigkeit nach einem 5-teiligen Score (1= unzureichend, 5= sehr gut)

Patient	Bildqualität												Diagn. Wertigkeit
	1a	1b	1c	1d	2a	2b	3a	3b	3c	3d	Zusatz	MW	
1							2	4	3	3		3,00	2
2	4	5	5	4								4,50	4
3							5	5	5		5	5,00	5
4							5	5	5			5,00	5
5	5	5	5	5								5,00	5
6								3	2	4	4	3,25	2
7		3	4	2							4	3,25	4
8							4	4	4	2		3,50	4
9							2	4	3	4		3,25	4
10	5	5	2	4								4,00	4
11							5	5	5	5		5,00	5
12							5	5	5	5		5,00	5
13							5	5	5		5	5,00	5
14		4	3									3,50	4
MW												4,2	4,1
SA												0,8	0,8

MW = Mittelwert, SA = Standardabweichung

Die folgenden Abbildungen demonstrieren exemplarisch die Vorteile der virtuellen Zisternoskopie gegenüber der zweidimensionalen Bildgebung bezüglich der Darstellung komplexer Pathologien.

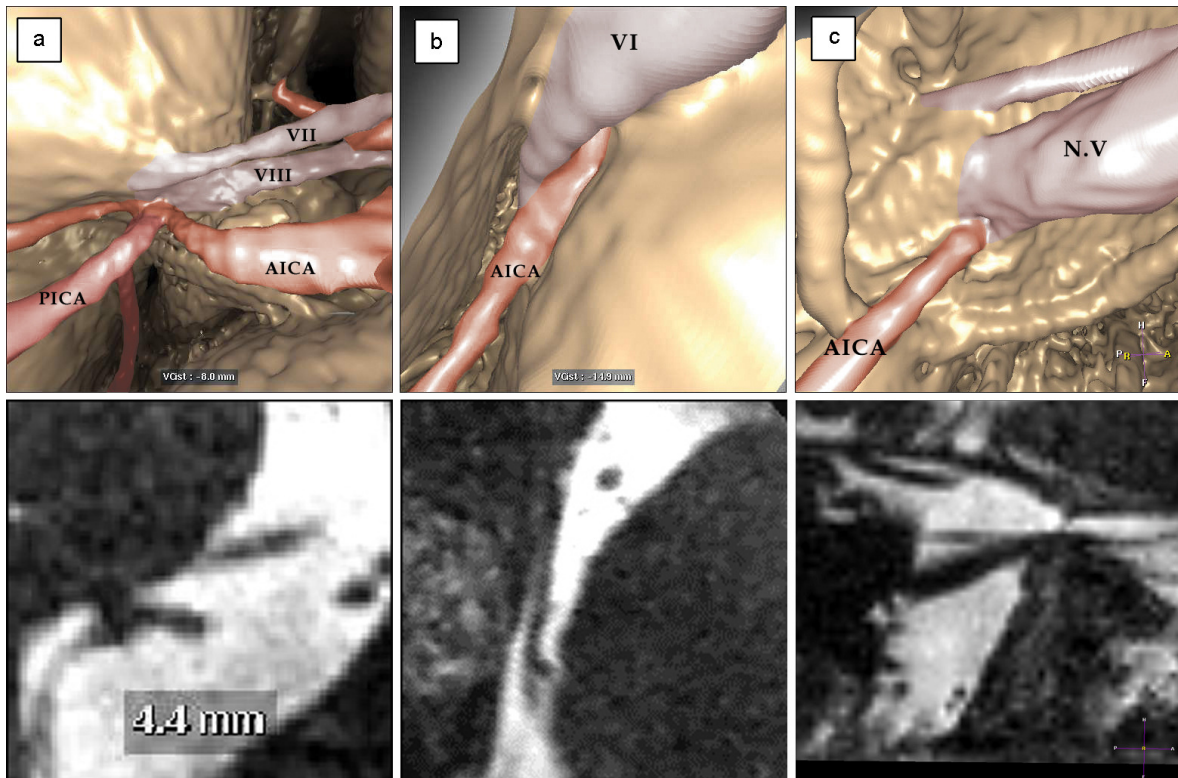


Abb. 14 a-c: Visualisierung neurovaskulärer Konflikte mittels VZ und MPR
a) Neurovaskulärer Konflikt (NVK) auf der Höhe der WEZ zwischen dem HN VIII und der AICA.
b) Intrazisternaler NVK zwischen HN VI und der AICA. **c)** NVK zwischen HN V und der AICA.

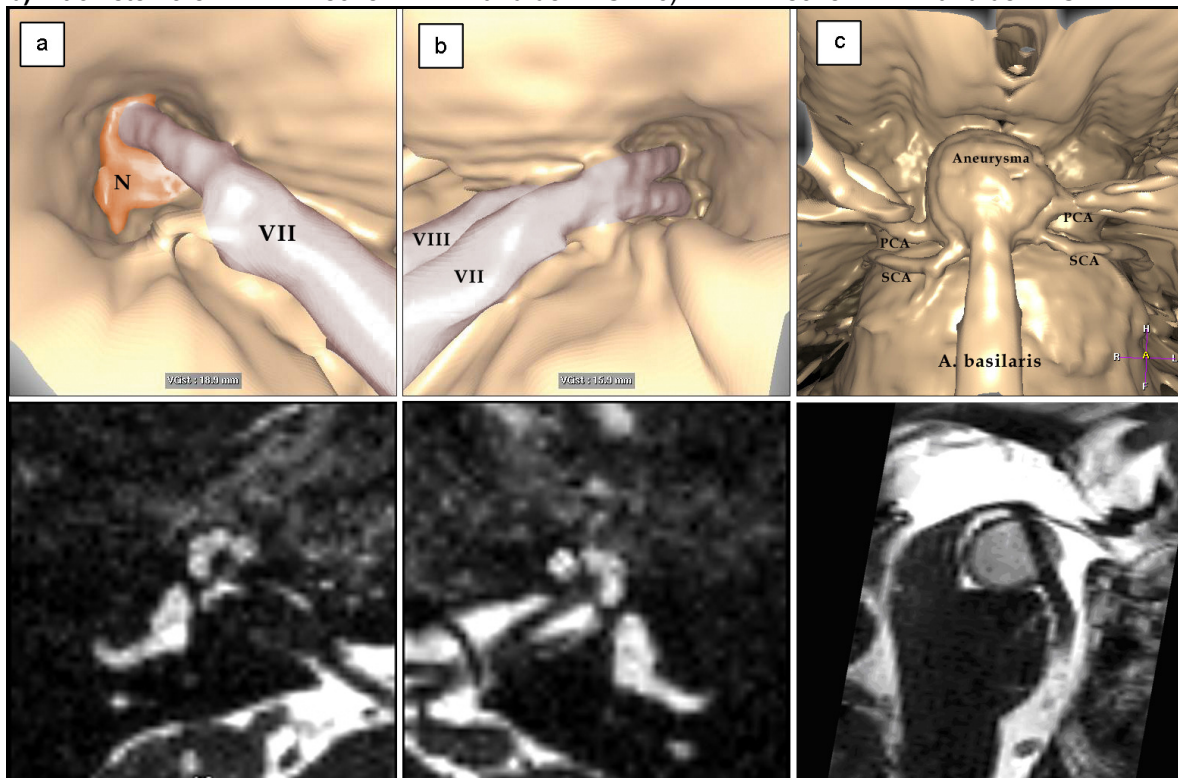


Abb. 15 a-c: Visualisierung eines Akustikusschwannoms und eines Basilarisaneurysmas mittels VZ und MPR
a-c) intrameatales Schwannom des N. vestibularis sup. rechts; **a)** Die Nn. facialis et cochlearis werden durch die intrameatale Raumforderung auseinandergedrängt. Der Fundus des MAI ist obliteriert. **b)** Kontralateraler Normalbefund zum Vergleich. **c)** Aneurysma der A. basilaris aus dem die A. superior cerebelli (SCA) und die A. cerebri posterior (PCA) abgehen.

3.2.2 Nachkontrollstudie

Retrospektiv wurden die Krankengeschichten von 29 Patienten ausgewertet, bei denen die virtuelle Zisternoskopie durchgeführt und ein neurovaskulärer Konflikt (n=23) bzw. ein neurales Kompressionssyndrom anderer Genese (n=6) diagnostiziert worden waren. Bei 5 von 29 Patienten war eine Aussage über die klinische Relevanz der bildgebenden Diagnostik nicht möglich. Gründe dafür waren nicht auffindbare Akten (n=2), kein weiterer Besuch der Patienten in der Poliklinik, die die Bildgebung veranlasst hatte (n=2) und die Diagnose eines bekannten, nicht progredienten Akustikusneurinoms, das auch weiterhin beobachtet werden sollte. Von den verbliebenen 24 radiologischen Befunden waren 10 diagnosebildend. In diesen Fällen, sowie in sechs weiteren, in denen es nicht um die Primärdiagnostik, sondern lediglich um das Ausmaß bzw. die Bestätigung der Befunde ging, ergaben sich aus der VZ- Bildgebung Konsequenzen für das weitere therapeutische Vorgehen.

Zusätzlich zu diesen 16/24 Patienten wurde bei weiteren 5 Patienten der VZ-Befund als eine der Differentialdiagnosen aufgenommen. In 3 von 24 Fällen wurde die radiologische Diagnose aufgrund divergenter klinischer Untersuchungsergebnisse differentialdiagnostisch nicht in Betracht gezogen.

Die therapeutischen Konsequenzen bestanden zumeist in einer medikamentösen Therapie mit Carbamazepin. Darüber hinaus wurden im weiteren Verlauf neun Patienten gemäß den Befunden der virtuell-zisternoskopischen Bildgebung zur Klärung einer Operationsindikation neurochirurgisch vorgestellt. In 2 von 9 Fällen wurde aufgrund von Tumoren im Fundus des inneren Gehörganges bereits eine Operation durchgeführt. Dabei konnten intraoperativ die radiologischen Diagnosen und die Zuordnungen der Schwannome zu den Anteilen des akustikofazialen Bündels (N. vestibularis sup. und N. facialis) bestätigt werden. Bei 3 von 9 Patienten wurde zum Abschluss der Arbeit eine neurochirurgische Intervention geplant. Eine Patientin lehnte einen neurochirurgisch indizierten Eingriff ab. Bei den restlichen Patienten lagen bei Fertigstellung der vorliegenden Untersuchung noch keine Informationen über Planung oder Durchführung einer Operation vor.

Bei 3 Patienten mit neoplastischen Raumforderungen erfolgte eine Bestrahlung.

Tab. 4: Klinische Relevanz der virtuell zisternoskopischen Bildgebung

Pat.	Befund	Diagnose- bildend	therapie- relevant	als DD aufgen.	OPV	Op	intraop. Bestät.	Bestrahlung	Nicht diagnose- bildend	keine Aussage
M.C.	NVK HN V	x	X		x					
H.M.	NVK HN V	x	X							
R.B.	NVK HN V		X		x					
G.G.	NVK HN V	x	X							
B.S.	NVK HN V			x						
J.A.	NVK HN V	x	X							
A.C.	NVK HN VII	x	X		x					
P.H.	NVK HN VII		X		x					
I.H.	NVK HN VII/VIII			x						
B.P.	NVK HN VII/VIII			x						
B.H.	NVK HN VII/VIII								X	
K.I.	NVK HN VII/VIII	x	X							
P.C.	NVK HN VII/VIII									x
L.G.	NVK HN VII/VIII								X	
M.U.	NVK HN VIII									x
B.H.	NVK HN VIII	x	X		x					
R.A.	NVK HN VIII		X		x					
L.J.	NVK HN VIII									x
R.R.	NVK HN VIII									x
G.H.	NVK HN VIII								x	
S.H.	NVK HN VIII			x						
K.K.	NVK HN VIII			x						
O.W.	NVK HN VIII		X		x					
K.K.	AKN	x	X		x	x	x			
M.E.	Schwannom des HN.VII	x	X		x	x	x			
F.F.	AKN (bekannt)									x
B.O.	Ependymom Z.n. subtotaler Re- sektion		X					x		
S.G.	Meningeom mit Kompr. HN V	x	X					x		
B.E.	RF in der Cister- na pontocerebel- laris		X					x		
Summe		10	16	5	9	2	2	3	3	5

DD = Differentialdiagnose, OPV = Vorstellung zur Operation, Op = operiert, AKN = Akustikus-
schwannom, Kompr. = Kompression, RF = Raumforderung

3.3 Gesamtkollektiv

Die radiologischen Befunde im Gesamtkollektiv verteilten sich wie folgt: neuro-
vaskuläre Konflikte (64,3%), Normalbefunde (16,1%), neurovaskuläre Kontakte
(5,4%), Akustikusschwannome (3,6%), Facialisschwannom (1,8) Metastase eines
Mammakarzinoms (1,8%), Meningeom (1,8 %), Ependymom (1,8%), Arachnoidal-
zyste (1,8%), Neuritis N. trigemini (1,8%).

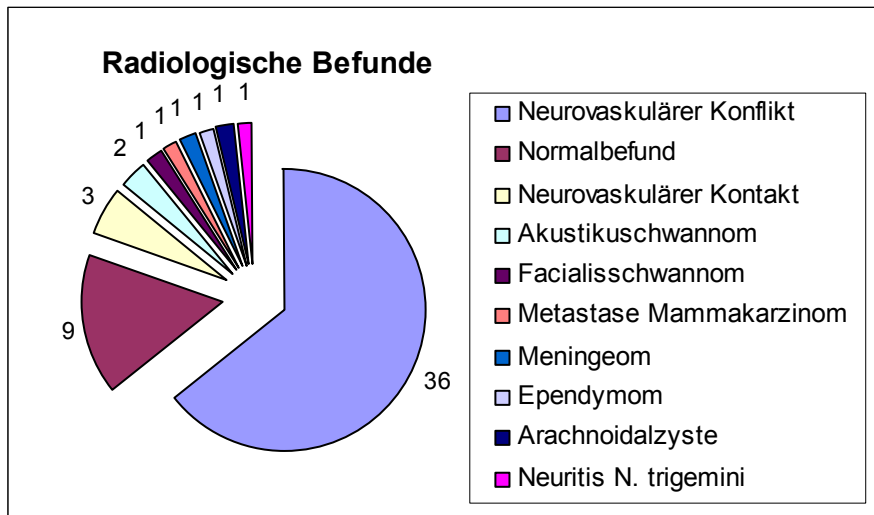


Abb. 16: Anzahl und Verteilung der radiologischen Befunde im Gesamtkollektiv

Unter den neurovaskulären Konflikten war am häufigsten eine Affektion des N. vestibulocochlearis, gefolgt von der des N. trigeminus und einer gemeinsamen Affektion der Nn. facialis und vestibulocochlearis zu beobachten. Der N. facialis allein war im Kollektiv nur zweifach von einem neurovaskulären Konflikt betroffen und für den N. abducens ließ sich lediglich in einem Fall ein Kontakt nachweisen, dessen klinische Bedeutung fraglich war.

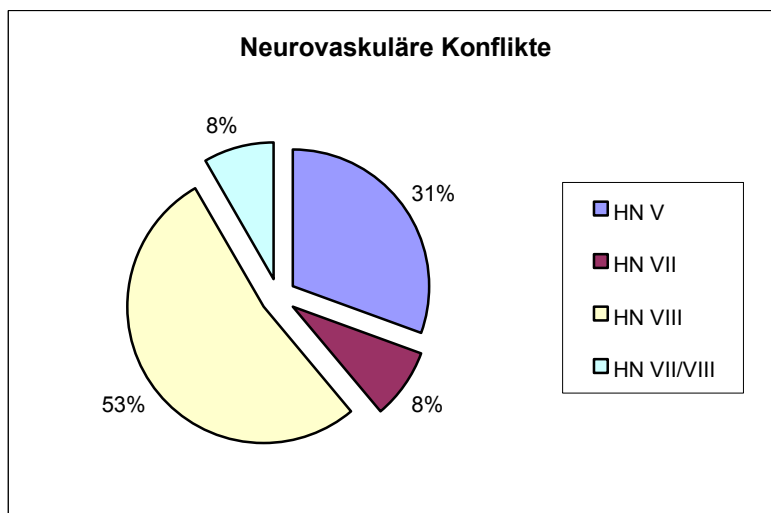


Abb. 17: Prozentuale Verteilung der neurovaskulären Konflikte hinsichtlich der betroffenen Hirnnerven

Den Anteil der männlichen bzw. weiblichen Patienten an den NVK der einzelnen Hirnnerven illustriert Abb. 18.

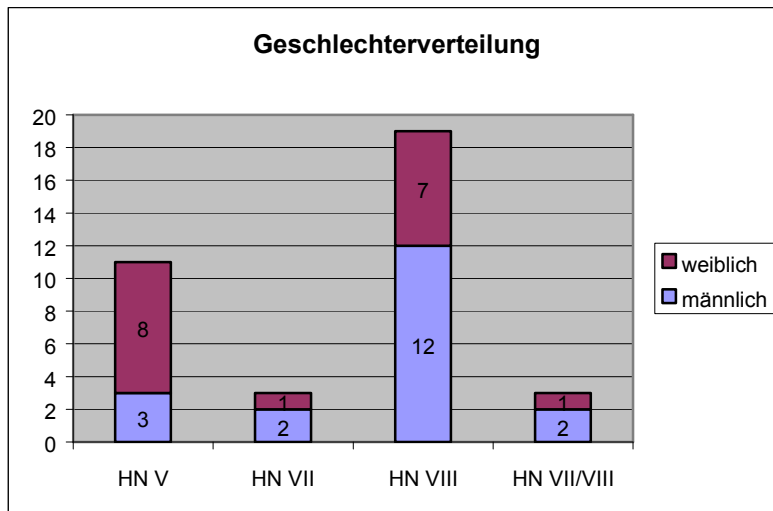


Abb. 18: Geschlechterverteilung der NVK der einzelnen Hirnnerven

Aufgrund des begrenzten Messfeldes war es nur in 19/39 Fällen möglich, das verursachende Gefäß eines neurovaskulären Konfliktes bzw. Kontaktes zu benennen. Häufigsten Auslöser war die AICA, gefolgt von der A. vertebralis und der A. basilaris. Seltener fanden sich in diesem Zusammenhang die V. petrosa und die PICA. Die prozentuale Beteiligung der einzelnen Gefäße ist in Abb. 19 dargestellt.

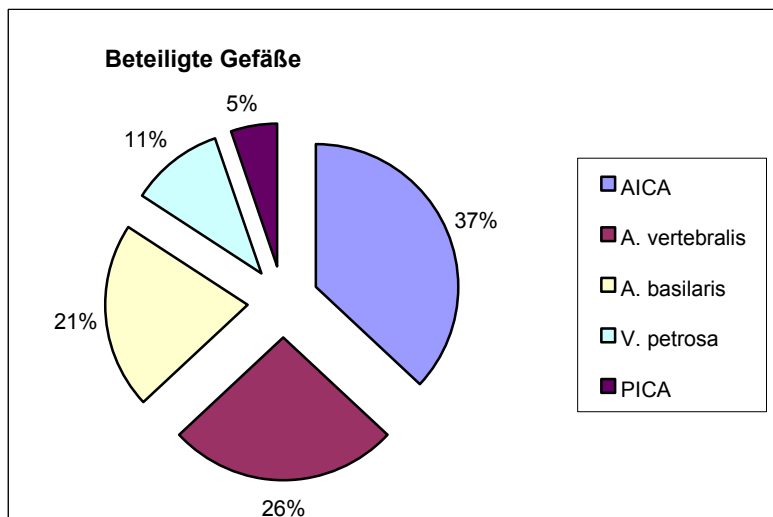


Abb. 19: Prozentuale Verteilung der Gefäße hinsichtlich ihrer Beteiligung an neurovaskulären Konflikten bzw. Kontakten (nur eindeutig identifizierte Gefäße)

4 Diskussion

4.1 Notwendigkeit der Darstellung der basalen Zisternen

Die neuroendoskopische Untersuchung der basalen Zisternen wurde erstmals 1917 von Doyen [19] beschrieben. Sie stellt eine invasive Maßnahme dar, die in der Regel wegen der damit verbundenen Risiken nicht allein zu diagnostischen Zwecken, sondern nur im Rahmen eines therapeutischen Eingriffs angewendet wird. Fortschritte in der Technologie endoskopischer Optiken und Lichtquellen, sowie der Bildwiedergabe [20] führten zu einem verstärkten Interesse an der Technik der Neuroendoskopie in der ersten Hälfte des letzten Jahrzehnts [21, 22, 23, 24, 25], in dessen Folge der Bedarf an adäquater präinterventioneller Bildgebung relevanter neurovaskulärer Strukturen wuchs.

Die sehr guten Langzeitergebnisse bei neurochirurgisch durchgeführten mikrovasculären Dekompressionsoperationen (MVD) (absolute Symptomfreiheit bei 70% [Trigeminusneuralgie (TGN)] bzw. 84% [Hemispasmus facialis (HSF)] der Patienten nach 10 Jahren [26, 27]) haben das diagnostische und therapeutische Interesse an den zisternalen Kompartimenten weiter gefördert. Ebenso wurden für Patienten mit Schwindel und Tinnitus, basierend auf vaskulärer Kompression des N. vestibulocochlearis, gute bis sehr gute Ergebnisse nach MVD beschrieben [28]. Für die Vestibularis-Paroxysmie beschreibt Möller [29] eine Heilungsrate von ca. 80 %. Zisternale Pathologien des N. abducens sind in Einzelfällen beschrieben [30].

4.2 Krankheitsbilder

Die epidemiologische Bedeutung von Erkrankungen, deren Ursache in neurovaskulären Konfliktsituationen liegt, wird unterstrichen durch deren Inzidenzraten, wobei Frauen (TGN: 5,9/100.000 und HSF: 0,81/100.000 pro Jahr) häufiger betroffen sind als Männer (TGN: 3,4/100.000 und HSF: 0,74/100.000 pro Jahr) [31, 32]. Für die Häufigkeit vestibulocochleärer Pathologien vaskulärer Genese sind keine genauen Zahlen bekannt, es wird jedoch eine Inzidenzrate oberhalb der für die TGN angenommen [16].

Der Leidensdruck der Erkrankten kann je nach Ausprägung der Symptome sehr hoch sein. Patienten mit TGN leiden unter Anfällen von blitzartig einschießenden Schmerzen im Gesichtsbereich, die für einen Zeitraum von Sekunden bis Minuten

anhalten. Bevorzugt sind die Segmente V_3 und V_2 , allein oder in Kombination betroffen, selten ist auch V_1 involviert [31].

Da die Anfälle durch Berührung oder Reizung (Kälte, Wärme, Sprechen, Kauen, Niesen etc.) so genannter Triggerpunkte im Gesicht ausgelöst werden können, ergeben sich aus deren Vermeidung ganz erhebliche Einschränkungen bei Tätigkeiten des alltäglichen Lebens (Waschen, Rasieren, Essen, Sprechen). Gewichtsverlust und soziale Isolation können die Folge sein.

Der Hemispasmus facialis ist gekennzeichnet durch unwillkürlich anfallsartig auftretende tonische oder klonische Kontraktionen der Gesichtsmuskulatur, die, typischerweise im M. orbicularis oculi beginnend, sich auf die kaudal gelegenen Gesichtsmuskelpartien ausbreiten. Atypische Formen des HSF, in deren Verlauf zuerst die buccale Muskelregion betroffen ist und später eine Ausbreitung nach rostral erfolgt, können ebenso auftreten wie seltene beidseitige Spasmen [33, 34]. Die Patienten haben Schwierigkeiten beim Lesen, Arbeiten, Autofahren und sind sozial und psychisch stark beeinträchtigt.

Die Symptome einer vaskulären Kompression des N. vestibulocochlearis sind im Anfangsstadium Schwindel, der für Sekunden bis Minuten anhält und unabhängig von der Lage des Kopfes auftritt, sowie Tinnitus. Im fortgeschrittenen Stadium entwickeln sich zusätzlich Hörstörungen und die Dauer der Schwindelattacken nimmt zu. Wegen der Ähnlichkeit der Symptome werden die NVK des HN VIII gelegentlich als M. Menière (Schwindel dauert gewöhnlich Stunden) oder benigner paroxysmaler Lagerungsschwindel (Schwindel kann durch Änderung der Kopfposition provoziert werden) fehldiagnostiziert [28, 35].

4.3 Anforderungen an die Darstellung der basalen Zisternen

Die diagnostische Wertigkeit der präoperativen Bildgebungstechniken bei Patienten mit Verdacht auf einen neurovaskulären Konflikt wird weitgehend von deren Eignung beeinflusst, neurovaskuläre Kontakte zu visualisieren. In mehreren Studien konnte die Eignung der MRT belegt werden, Hirnnerven in ihrem intrazisternalen Verlauf detailliert abzubilden [5, 36, 37]. Zur Darstellung neurovaskulärer Kontaktzonen wurde empfohlen, dünnschichtige MRT-Sequenzen zu wählen, teilweise kombiniert mit MR-Angiographie-Sequenzen [7, 38, 39, 40].

Die erstmals 1993 von Casselman et al. vorgestellte stark T2-gewichtete Gradientenechosequenz 3DFT (dreidimensionale Fourier Transformation) CISS (construc-

tive interference in steady state) [5] wurde als methodische Grundlage des Datenakquisitionsprotokolls gewählt, da deren Eignung zur hochauflösenden Bildgebung des Kleinhirn-Brückenwinkels bereits in mehreren Studien nachgewiesen werden konnte [5, 11, 37, 41, 42]. Darüber hinaus wird ihr die höchste diagnostische Effektivität in der intrazisternalen Darstellung der Hirnnerven und der Detektion operativ verifizierter neurovaskulärer Konflikte im Bereich des KHBW zugesprochen [6, 7, 8, 9].

Nach Naganawa ist die 3D-FASE (3D Fast Asymmetrical Spin-echo) Sequenz bei vergleichbarem Signal-zu-Rausch-Verhältnis der CISS Sequenz in der Reduktion von Flussartefakten im Liquor überlegen [15]. Als wichtiger Grund hierfür ist die bei Spin-Echo-Sequenzen vor der Signalauslesung durchgeführte Protonenrefokussierung anzuführen. Die von Naganawa beschriebenen Vorteile der FASE Sequenz bzw. deren Eignung als Grundlage für die virtuelle Zisternoskopie konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden, da die Sequenzprotokolle vom Hersteller vorgegeben werden und auf dem verwendeten MRT-Scanner die 3D-FASE-Sequenz auch nach Rücksprache mit dem Hersteller bzw. den Applikationsingenieuren nicht implementierbar war.

Das prinzipielle Problem in der Visualisierung neurovaskulärer Kontaktbereiche liegt in der Unterscheidung zwischen einem einfachen Kontakt und einer neurovaskulären Konfliktsituation mit Krankheitswert. Als Hilfskriterien können hier, neben der Klinik, die Verlagerung bzw. die Verformung des betroffenen Hirnnerven [43, 44], sowie die präzise Lokalisation der Kontaktstelle, vor allem der Nachweis einer Beteiligung der Wurzeleintrittszone (WEZ) bzw. des zentralnervösen Anteils des HN herangezogen werden [16].

Naturgemäß sind die Informationen über alle drei Merkmale - Verlagerung, Verformung und genaue Lage der Kontaktstelle - schon im Originaldatensatz enthalten. Sie lassen sich jedoch dreidimensional mittels VR in nur wenigen neuroendoskopieähnlichen Bildern darstellen, während eine zweidimensionale Abbildung eine Vielzahl von speicherintensiven Schnittbildern bzw. Reformationen, sowie ein hohes Maß an räumlichem Vorstellungsvermögen erfordert. Während für einen diesbezüglich erfahrenen Radiologen oder Neurochirurgen die mentale 3D Transformation der Schnittbilddaten ein trainierter Vorgang ist, zeigen sich die Vorteile der virtuellen Zisternoskopie besonders in der interdisziplinären Befunddemonstration bei Kollegen und Patienten, die damit weniger vertraut sind.

Boor et al. betonen den Wert der VZ auch für die präoperative Planung des neurochirurgischen Zugangs, u.a. bei neurovaskulären Kompressionssyndromen [45]. Ein Vorteil der VZ gegenüber der invasiven Endoskopie der Liquorräume ist die Möglichkeit, Strukturen jenseits von Hindernissen, wie z.B. Tumoren im Meatus acusticus internus zu visualisieren, ohne diese verletzen zu müssen.

Die von anderen Autoren [10, 46] benannten Einschränkungen der virtuell-zisternoskopischen Darstellung wie Untersucherabhängigkeit, die Abhängigkeit der dargestellten Strukturen von der Wahl des Schwellenwertes, das Auftreten typischer Bildartefakte und die eingeschränkte Darstellbarkeit von Strukturen in engen Zisternen bzw. von Strukturen geringer Größe traten auch im Rahmen dieser Arbeit auf. Neben Flussartefakten spielten vor allem Pulsationsartefakte der A. basilaris, der A. carotis interna und der A. vertebralis eine wichtige Rolle. In einigen Fällen wurde die Variation der Rekonstruktionsparameter, vor allem des Schwellenwertes und des Depth Cueing, sowie auch der Kameraposition erforderlich.

Wie auch von Boor et al. [45] gefordert ergibt sich aus den Schwierigkeiten der virtuell-zisternoskopischen Darstellung der basalen Zisternen die Notwendigkeit einer Vereinheitlichung der Untersuchungsmethode. Ziel dieser Arbeit war es zum einen, die Detailauflösung in der Datenakquisition zu verbessern und zum andern ein standardisiertes Nachverarbeitungsprotokoll zu entwickeln, mit dessen Hilfe auch von unterschiedlichen Untersuchern erstellte, virtuell-zisternoskopische Ansichten der HN V-VIII vergleichbar sein sollten.

4.4 Methodische Voruntersuchungen

4.4.1 Die Datenakquisition

Das Datenakquisitionsprotokoll auf der Basis einer 3DFT CISS-Sequenz konnte bezüglich der Eignung für die klinische Routinebildgebung soweit optimiert werden, dass die Untersuchungsdauer mit 10:03 min deutlich unter der gesetzten Grenze von 15 min blieb. Damit überschreitet die Dauer des eingesetzten Protokolls nicht diejenige anderer hochauflösender MRT-Sequenzen, die in der Routinebildgebung eingesetzt werden (z.B. MR-Angiographie, MP-Rage-Sequenz). Da die genannten Sequenzen, in der von den Herstellern implementierten Form, in der Regel keine Messzeit über 15 min haben, sollte diese Zeit als Obergrenze für die Dauer der Datenakquisition angesehen werden.

Die erreichte Reduktion der Messzeit konnte vor allem durch eine im Vergleich zu anderen Arbeiten reduzierte Blockbreite von nur 32 mm (gegenüber 45 mm bei Shigematsu et al. [11]) und durch die Reduktion des Phasen-Oversamplings auf 50% erreicht werden. Die reduzierte Blockbreite der Sequenz, die zugleich auch zur Darstellung des Innenohres entwickelt wurde, setzt zwar eine präzise Zentrierung in Höhe des inneren Gehörganges voraus, ermöglicht dann aber in der weit überwiegenden Zahl der Fälle die Abbildung der epidemiologisch bedeutsamen Konfliktzonen der HN V-VIII. Als Einschränkung muss hier gesehen werden, dass das reduzierte Messvolumen nur in ca. 50% der untersuchten Fälle eine Benennung der an NVK beteiligten Gefäße ermöglichte.

Da in vergleichenden Studien bereits festgestellt werden konnte, dass 3D-Rekonstruktionen auf der Basis isotroper Voxel (Ausdehnung in alle drei Raumebenen gleich) denen basierend auf anisotropen Voxeln sowohl in Schärfe als auch in Reproduzierbarkeit in verschiedenen Raumebenen signifikant überlegen sind [47, 48], wurden Field of View (FOV), Matrix und Schichtdicke so gewählt, dass Voxel mit einer Kantenlänge von 0,5 mm akquiriert werden konnten. Damit wurde erstmalig in der 3D Darstellung der basalen Zisternen eine MRT-Sequenz mit

isotropen Voxeln etabliert, deren Voxel-Volumen mit $0,125 \text{ mm}^3$ unter den bisher beschriebenen Volumina liegt und so über die höchste räumliche Auflösung verfügt [10, 12, 49].

4.4.2 Die Nachverarbeitung

Das Volume Rendering wurde als technische Grundlage des Nachverarbeitungsprotokolls gewählt, weil es als einziger derzeit verfügbarer 3D Nachverarbeitungsalgorithmus erlaubt, den vollständigen Untersuchungsdatensatz mit in die Rekonstruktion einzubeziehen. Der komplette Datensatz wird je nach Schwellenwert in sichtbare und unsichtbare Voxel eingeteilt. Dadurch ist eine Navigation durch das gesamte Untersuchungsvolumen und ein „Durchfliegen“ der Oberflächen in dahinter liegende „Hohlräume“ mit der virtuellen Kamera möglich. Dies ist die Voraussetzung für die Darstellung der Hirnnerven im Inneren der basalen Zisternen. Aufwendige Vorbereitungen und Selektionen des Datensatzes sind nicht nötig.

Die Standardansichten des Nachverarbeitungsprotokolls beinhalten die Darstellung der pathophysiologisch relevanten Strukturen der basalen Zisternen: der Wurzeintrittszone (WEZ) des N. trigeminus am Pons, des Kleinhirnbrückenwinkel mit den WEZ der Nn. facialis et vestibulocochlearis, deren Eintritt in den Meatus acusticus internus und der WEZ des N. abducens. Diese Strukturen wurden als relevant betrachtet, da dort neurovaskuläre Konflikte vorwiegend zu erwarten sind [6, 14, 41, 50, 51, 52, 53].

Bezüglich der Bedeutung der häufigen Schleife der AICA in den MAI für neurovaskuläre Konflikte herrscht in der Literatur noch Uneinigkeit [54, 55]. Da sie unter Umständen jedoch Ziel einer operativen Dekompression sein kann und wegen der Bedeutung der Region für Akustikusschwannome wurde der Meatus acusticus internus in die VZ Bildgebung miteinbezogen.

In Übereinstimmung mit anderen Autoren [10] zeigte sich, dass die virtuelle Zisternoskopie ein komplementäres Untersuchungsverfahren ist, dessen diagnostische Wertigkeit nur zusammen mit den primären Schnittbildern gegeben ist. Wegen deren Variabilität erfordert insbesondere die Identifikation und Benennung der Gefäße ein Durchmustern des originalen Schnittbilddatensatzes. Diese Funktion wird von der Volume-Rendering-Software in der Regel parallel zur Rekonstruktion bereitgestellt, so dass zu jedem Zeitpunkt der Nachverarbeitung eine räumliche Orientierung gewährleistet ist.

Nach Beendigung des Rekonstruktionsprozesses und Fertigstellung der VZ-Ansichten kann es für den nachfolgenden Betrachter ohne das Wissen um die exakte Kameraposition und Blickrichtung schwierig werden, die detaillierten Informationen der 3D Darstellungen zu verstehen und zu nutzen. Abhilfe schafft hier ein standardisiertes virtuell-zisternoskopisches Nachverarbeitungsprotokoll, wie es erstmalig 2002 als Vorauszug aus dieser Arbeit veröffentlicht wurde [49].

Die Betrachtung der pathoanatomisch bedeutsamen Strukturen im KHBW immer aus den gleichen Perspektiven, eventuell mit Hilfe von Referenzbildern (siehe Abb. 11-13), erleichtert die Orientierung und hilft bei der Identifizierung der Hirnnerven auch in komplizierten anatomischen Verhältnissen.

Die exakte Blickrichtung wird mit Hilfe eines Orientierungskreuzes am rechten unteren Bildrand veranschaulicht. Die drei Raumachsen zeigen jeweils in Richtung des Kopfes (H) und der Füße (F), nach rechts (R) und links (L) bzw. nach anterior (A) und posterior (P). Die Standardansichten wurden so gewählt, dass ihre vertika-

le Ausrichtung jeweils weitestgehend mit den Achsen H \longleftrightarrow F oder A \longleftrightarrow P übereinstimmt.

Die nachträgliche Farbkodierung der tubulären Strukturen in den Zisternen mittels handelsüblicher Bildbearbeitungssoftware ist durch die weitere Veranschaulichung von Nerven und Gefäßen hilfreich bei der Orientierung und erleichtert die Befundpräsentation und -dokumentation. Sie birgt allerdings die Gefahr der Weitergabe von Fehlzusammenhängen von Strukturen an nachfolgende Betrachter. Auch hier zeigt sich die Notwendigkeit der Bereitstellung des 2D Datensatzes und der 3D Referenzbilder zur Nutzung und Einordnung der zisternoskopischen Rekonstruktionen.

4.5 Anwendungsstudien

4.5.1 Die Hauptstudie

Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz des Volume Rendering, als semiautomatisiertes Nachverarbeitungsverfahren, basierend auf 3D MRT Datensätzen, die Darstellung intrazisternaler Pathologien der Hirnnerven V-VIII auf einer geringen Anzahl von Standardansichten möglich ist.

Das entwickelte Nachverarbeitungsprotokoll erwies sich bezüglich der Nachverarbeitungsdauer als geeignet für den Einsatz in der neuroradiologischen Bildgebungsroutine.

In einigen Fällen führten besonders schwierige pathoanatomische Verhältnisse bzw. ein artefaktreicher Datensatz zu einer Verlängerung der Nachverarbeitungszeit vor allem für die HN VII/VIII und V. Bei diesen Patienten hätte allerdings auch die alleinige Auswertung der axialen bzw. reformatierten Schnittbilder deutlich mehr Zeit beansprucht als im Regelfall. Da durch die virtuelle Zisternoskopie mit ihren dreidimensionalen Eindrücken schon im Nachverarbeitungsprozess eine intensive Auseinandersetzung mit den räumlichen Verhältnissen in den Zisternen stattfand, wurde zusätzlich das Verständnis der neurovaskulären Beziehungen vertieft und die Orientierung auch an den axialen Quellbildern erleichtert. Dies relativiert die Dauer der VZ-Rekonstruktion.

Die Bildqualität der nach dem Standard-NV-Protokoll entstandenen Rekonstruktionen wurde in der verblindeten Evaluation durch zwei Neuroradiologen in allen bis auf einen Fall als erfolgreich (Score: >3) beurteilt. Die diagnostische Wertigkeit, die nicht nur die Bildqualität, sondern auch die Erfassung aller kritischen Bildele-

mente beinhaltet, wurde gleichfalls in einem Großteil der Fälle (12/14) als erfolgreich angesehen. Bei mehr als $\frac{3}{4}$ der Patienten, bei denen eine VZ mit hinreichender Bildqualität und diagnostischer Wertigkeit durchgeführt werden konnte, war eine radiologische Diagnosestellung mit Hilfe der VZ möglich.

Die Ursachen für die teilweise erforderlichen Variationen der Kameraposition lagen hauptsächlich in den variablen Verläufen der Gefäße, die dann die darzustellenden HN-Abschnitte überlagerten. Weiterhin erschwerten bei manchen Patienten die sehr engen Zisternen, die keinen ausreichenden Abstand von den darzustellenden Strukturen und so keinen ausreichenden Überblick ermöglichten, die Rekonstruktion. Während in letzteren Fällen oft die Erhöhung des perspektivischen Blickwinkels auf 120° hilfreich war, musste bei Gefäßüberlagerung der darzustellenden Strukturen der Standpunkt der Kamera verändert werden. Bei zwei Patienten wurde auf je eine Ansicht verzichtet, da eine Positionierung der Kamera wegen großer Raumforderungen nicht möglich war. Probleme, die in zwei Fällen dazu führten, dass eine virtuelle Zisternoskopie nicht mit hinreichender Bildqualität durchgeführt werden konnte, waren Pulsations- und Bewegungsartefakte. Sind diese zu stark ausgeprägt, wird ein schwellenwertbasiertes Volume Rendering unmöglich, da sich die Intensitäten der MRT-Signale von Liquorartefakten und Nervengewebe teilweise überlappen. Folglich müsste zur ausreichenden Reduktion der Rekonstruktionsartefakte der obere Schwellenwert soweit gesenkt werden, dass Teile des Nervengewebes ebenfalls aus der VZ-Ansicht eliminiert würden. Eine sinnvolle Befundung ist dann nicht mehr möglich.

Daher ist es bedeutsam, bereits bei der Datenakquisition vermeidbare Artefakte, wie z.B. durch falsche Lagerung des Kopfes im MRT-Scanner, zu minimieren. Einen anderen Ansatz könnte die Erprobung der 3D-FASE (3D Fast Asymmetrical Spin-echo) Sequenz bieten, die nach Naganawa bei vergleichbarem Signal-zu-Rausch-Verhältnis gegenüber der CISS-Sequenz eine Verringerung der Flussartefakte im Liquor erreichen soll [15]. Ihr Einsatz zur Durchführung der virtuellen Zisternoskopie ist in der Literatur bisher allerdings noch nicht beschrieben worden.

4.5.2 Nachkontrollstudie

In der Nachkontrollstudie konnte gezeigt werden, dass die Befunde der virtuellen Zisternoskopie in 21/24 Fällen direkten Einfluss auf die Diagnosebildung und Therapie der Patienten hatten oder zumindest als Differentialdiagnosen einbezogen

wurden. Bei den drei anderen Patienten waren die Ergebnisse der klinischen Untersuchungen mit den Befunden der radiologischen Bildgebung nicht vereinbar. Als Ursache für den Schwindel wurden in diesen Fällen eine Neuropathia vestibularis und eine transitorische ischämische Attacke (TIA) bei hämodynamisch signifikanten Carotisstenosen diagnostiziert, ein Verdacht auf einen NVK des HN VIII wurde angiographisch nicht bestätigt.

Die Korrelation der Bildgebungsbefunde mit den intraoperativen Befunden konnte nur bei zwei Patientinnen durchgeführt werden, bei denen intrameatale Tumoren diagnostiziert und behandelt wurden. In beiden Fällen konnte die mit Hilfe von 2D- und 3D-Ansichten durchgeführte Zuordnung des Tumors zu den Komponenten des akustikofazialen Bündels (1 Schwannom des N. vestibularis sup., 1 Schwannom des N. facialis) intraoperativ bestätigt werden. Diese Zuordnung ist zur präoperativen Abschätzung des Ertaubungsrisikos und damit für die Patientenaufklärung von eminenter Bedeutung. So kann bei vorliegendem Schwannom des N. vestibularis (und nicht des N. cochlearis) in bis zu 82% der Fälle eine hörerhaltende Tumoresektion durchgeführt werden [56].

Von den 23 Patienten mit radiologisch diagnostiziertem neurovaskulären Konflikt wurde nur in insgesamt 7 Fällen eine neurochirurgische Behandlung in Betracht gezogen. Bei 3 Patienten wird eine Operation gegenwärtig geplant, eine Patientin entschied sich nach erfolgter Op-Aufklärung gegen die Operation. Bei den 3 anderen Patienten lagen zum Abschluss der Arbeit keine Informationen über den weiteren Verlauf der Therapie vor.

Eine mögliche Ursache für die geringe Anzahl der Operations-Kandidaten (7/23 diagnostizierten NVK) liegt in erster Linie in der Möglichkeit zur primär medikamentösen Therapie unter Vermeidung der Risiken eines intrakraniellen Eingriffs. Entsprechend den Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Neurologie steht z.B. bei der Trigemimusneuralgie vor einer chirurgischen Therapie zunächst die Durchführung einer konservativen Mono- bzw. Kombinationstherapie.

Zu den Medikamenten der 1. Wahl zählen die Antiepileptika Carbamazepin und Oxcarbazepin, jeweils in ansteigenden Dosierungen bis zur Symptombefreiheit oder dem Auftreten von intolerablen Nebenwirkungen. Sind diese nicht wirksam, stehen noch weitere Wirkstoffe wie Baclofen, Phenytoin oder Lamotrigin zur Auswahl. Erst bei Versagen der medikamentösen Therapie wird eine chirurgische Therapie empfohlen [57].

Ein Patient mit Hemispasmus facialis wurde mit Botulinumtoxin erfolgreich behandelt. Eine Patientin, deren Symptomatik von einem Hemispasmus facialis in eine Fazialisparese übergegangen war, lehnte, wie oben aufgeführt, eine empfohlene Dekompressionsoperation ab.

Schwindel, Hörstörungen und Tinnitus, wie sie auch bei neurovaskulären Konflikten unter Beteiligung des N. vestibulocochlearis vorkommen, stellen unspezifische Symptome dar, die die Indikationsstellung für eine Operation erschweren. Ryu et al. [28] konnten in ihren Untersuchungen darüber hinaus zeigen, wie groß die Häufigkeit von Fehldiagnosen in diesen Fällen ist. So fanden sich bei 75% ihrer Patienten mit der Diagnose eines M. Menière und 73% der Patienten mit der Diagnose eines benignen paroxysmalen Lagerungsschwindels operativ nachzuweisende neurovaskuläre Konflikte. Bezüglich des M. Menière wurde dieses Phänomen bereits 1988 von Möller beschrieben [35].

Diagnostische Zeichen, die statistisch nachgewiesen vermehrt bei NVK auftreten, sind nach Ruy [28] eine pathologische Antwort auf die thermische Reizung des Vestibularorgans, eine kurze Dauer des Schwindels, sowie spezielle Formen des Tinnitus. Zwar fordern die Autoren nach Diagnosestellung eine schnellstmögliche Operation der Patienten, doch wurden in ihre Analyse auch nur solche Patienten einbezogen, bei denen vorher bereits andere Therapieverfahren wie Carbamazepin-Therapie, Mikrozirkulationsverbesserung, Corticosteroid-Therapie, Biofeedback und andere versagt hatten.

Gegen ein großzügiges Stellen der Operationsindikation sprechen die Untersuchungsergebnisse von Makins et al. [54]. Sie zeigen an 112 Patienten mit einseitiger idiopathischer Schwerhörigkeit und/oder Tinnitus, dass das Auftreten einer Gefäßschleife der AICA, hier als Zeichen für einen möglichen NVK gewertet, sich nicht signifikant zwischen der betroffenen und der gesunden Seite unterscheidet.

Eine präzise Bildgebung und anschauliche Darstellung neurovaskulärer Kontakt- bzw. Konfliktpunkte des HN VIII sind also bedeutsam für die Diagnosebildung und Operationsvorbereitung, führen aber wegen der insgesamt unklaren Indikationen für operative Eingriffe und der umstrittenen Relevanz neurovaskulärer Konflikte bei den genannten Symptomen selten zu direkten Konsequenzen.

Ihre Relevanz zur Therapieplanung vor Bestrahlungstherapie konnte die VZ bei einem Patienten mit einem subtotal resezierten Ependymom im KHBW zeigen. Nachdem virtuell-zisternoskopisch eine direkte Kontaktsituation zwischen dem

Tumorst und dem N. facialis diagnostiziert worden war, wurde wegen der Gefahr einer Facialisparesie die ursprünglich geplante Strahlentherapie modifiziert.

4.6 Gesamtkollektiv

Die Gruppe der Patienten, für deren Symptomatik ein neurovaskulärer Konflikt als Ursache diagnostiziert wurde, hatte gemäß den Auswahlkriterien mit 64,3% den größten Anteil am Patientenkollektiv.

Dem Verhältnis der geschlechts- und altersadaptierten Inzidenzraten von Trigemini-neuralgie und Hemispasmus facialis ($4,7/100000:0,78/100000 = 6:1$) [31, 32] entsprechend fanden sich auch im betrachteten Patientengut deutlich mehr der NVK mit Beteiligung des HN V als solche mit Beteiligung des HN VII (11:3).

Neurovaskuläre Konflikte des N. vestibulocochlearis waren im vorliegenden Patientenkollektiv deutlich häufiger als solche des N. trigeminus. Dies entspricht den Untersuchungen von De Ridder et al. [16], die ausgehend von den unterschiedlichen Längen der zentralnervösen Anteile der HN V, VII, VIII und IX und den in der Literatur zu findenden Inzidenzen von NVK der HN V, VII und IX, feststellen, dass die Häufigkeit der NVK mit der Länge des zentralnervösen Anteils eines HN korreliert. Sie nehmen daher für den N. vestibulocochlearis ein deutlich häufigeres Auftreten von NVK als für die anderen HN an.

Das vermehrte Auftreten von Trigemini-neuralgien bei Frauen ($\text{♀} / \text{♂} = 5,7 / 2,5$ pro 100000) [31] spiegelte sich im Patientengut des Gesamtkollektivs wieder. Die Geschlechterverteilung beim Hemispasmus facialis lässt sich aufgrund der vergleichsweise geringen Fallzahl nicht sinnvoll beschreiben. Bezüglich einer geschlechtsspezifischen Verteilung von vaskulären Kompressionssyndromen des N. vestibulocochlearis findet sich in der Literatur keine Aussage.

Die vorliegenden Auswertungen gestatten keine hinreichend aussagekräftige Äußerung zu den Anteilen der einzelnen Gefäße an der Gesamtzahl der neurovaskulären Konflikte, da nur in knapp der Hälfte (19/39) der Fälle das beteiligte Gefäß spezifiziert werden konnte. Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich in der bereits diskutierten geringen Blockbreite der CISS-Sequenz.

In der Auswertung von 1204 Dekompressionsoperationen bei Patienten mit Trigemini-neuralgie fanden Jannetta et al. [26, 58] in 75,5% der Fälle die A. cerebelli superior (SCA) als verursachendes Gefäß, die AICA war in 9,6% der Fälle ursächlich beteiligt.

Vaskuläre Verursacher des Hemispasmus facialis sind nach Literaturangaben in erster Linie die PICA (42,7-68,2%), gefolgt von der AICA (35,3-37,4%) und der A. vertebralis (1,7-23,9%) [58, 59]

Für Konfliktsituationen mit dem N. vestibulocochlearis ist in der überwiegenden Zahl der Fälle (51,6-90%) die AICA verantwortlich. An zweiter Stelle folgt die A. vertebralis (9,9-12,9%) und die PICA (6,5%) [28, 60]

Darüber hinaus wird auch die Beteiligung von mehreren, oft nicht näher spezifizierten Arterien bzw. Venen als häufig beschrieben [26, 28, 58, 59].

Im untersuchten Kollektiv war der N. vestibulocochlearis (61% aller NVK), allein oder in Kombination, am häufigsten in neurovaskuläre Konflikte verwickelt. In Übereinstimmung mit der angeführten Literatur könnte das eine Ursache dafür sein, dass die AICA und die A. vertebralis einen so hohen Anteil an allen beteiligten Gefäßen erreichen. Die SCA wurde allerdings, entgegen den Erwartungen, in keinem Fall als Ursache einer Trigeminusneuralgie oder eines anderen Konfliktes befundet.

Möglicherweise ist der große Anteil der AICA aber auch darauf zurückzuführen, dass sie relativ leicht an der für sie typischen und häufigen Schleife in den inneren Gehörgang zu erkennen und damit zu benennen ist. Da die Sequenz auf diesen zentriert wird, war der Bereich immer vollständig abgebildet. Ähnlich eindeutig sind, wegen ihres Kalibers, die beiden Aa. vertebrales und die aus ihrem Zusammenfluss entstehende A. basilaris zu identifizieren.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, die Akquisition und Nachverarbeitung hochauflösender MRT-Bilddaten im Hinblick auf eine 3D-Visualisierung des intrazisternalen Verlaufes der Hirnnerven V-VIII zu optimieren.

Bezüglich der Datenakquisition sollte das zu definierende Untersuchungsprotokoll neben einer hohen Detailauflösung und einem adäquaten Signal-zu-Rausch-Verhältnis insbesondere die Eignung der Bildvolumenelemente (Voxel) zur multiplanaren und dreidimensionalen Nachverarbeitung gewährleisten, also dem Kriterium der Isotropie (gleiche Kantenlänge in allen Raumrichtungen) genügen. Dabei sollten in der klinisch-neuroradiologischen Bildgebung übliche Messzeiten für hochauflösende Sequenzen (≤ 15 min) nicht überschritten werden.

Bezüglich der Datennachverarbeitung sollte ein weitgehend untersucherunabhängiges standardisiertes und zeiteffizientes Protokoll definiert werden, das in der Lage ist, virtuell-zisternoskopische Darstellungen der genannten Hirnnerven in neuroendoskopieähnlicher Bildqualität zu erzeugen. Besonders berücksichtigt werden sollten pathophysiologisch bedeutsame Hirnnervenabschnitte.

Zunächst wurden exemplarisch in der Literatur beschriebene Verfahren der Zisternendarstellung nachvollzogen und hinsichtlich ihrer Bildqualität orientierend mit der für die MRT-Zisternographie beschriebenen 3DFT CISS Sequenz verglichen. Anschließend wurde eine systematische Variation der Akquisitionsparameter durch Probandenmessungen durchgeführt.

Bezüglich der Bilddatennachverarbeitung wurde zur 3D Visualisierung die Volume Rendering Technik ausgewählt, da nur sie eine interaktive Navigation unter Beibehaltung des gesamten Datensatzes gewährleistet.

Auf der Basis der in der Literatur benannten Prädilektionsstellen epidemiologisch bedeutsamer neurovaskulärer Kontakte bzw. Konflikte wurden standardisierte zisternoskopische Ansichten der Hirnnerven V-VIII definiert. Die zeiteffektive Erstellung dieser Ansichten wurde durch die Definition archivierbarer semi-automatisierter Nachverarbeitungsprotokolle gewährleistet. Die Angleichung des Bildcharakters an klinische Bildgebungstechniken erfolgte anhand neuroendoskopischer Vergleichsbilder.

Um eine untersucherunabhängige Orientierung innerhalb des virtuell-zisternoskopischen Visualisierungsprotokolls regelhaft zu ermöglichen, wurden

Referenzbilder bestehend aus der 3D Ansicht und einem 2D Schnittbild mit Markierung der Kameraposition und Blickrichtung erstellt.

In der Folge wurden die Datenakquisitions- und Nachverarbeitungsprotokolle angewendet bei insgesamt 29 Patienten, die von neurologischen, neurochirurgischen und/oder otochirurgischen Kliniken mit dem klinischen Verdacht auf einen neurovaskulären Konflikt oder ein anderes intrazisternales neurales Kompressionssyndrom vorgestellt wurden und die Ergebnisse der virtuell-zisternoskopischen Bildgebung evaluiert. In einem Subkollektiv von 14 Patienten wurde zunächst die Eignung des NV-Protokolls zum Einsatz in der klinisch neuroradiologischen Bildgebung bezüglich Nachverarbeitungszeit, Bildqualität und diagnostischer Wertigkeit untersucht. In dem Kollektiv von 29 Patienten wurde anhand von Patientenakten, Arztbriefen sowie, im Einzelfall, Nachbefragungen der behandelnden Ärzte ermittelt, ob die Ergebnisse der virtuell-zisternoskopischen Bildgebung diagnosebildend, differentialdiagnosebildend und/oder therapierelevant waren. Es wurde erfasst, ob eine operative Therapie erwogen oder durchgeführt wurde und mit welchem intraoperativen Befund dies geschah.

Die Patienten stammten aus einem Gesamtkollektiv von 56 Patienten, die zwischen Januar 2000 und Juni 2003 wegen des Verdachts auf einen neurovaskulären Konflikt der Hirnnerven V-VIII mit dem Standardakquisitionsprotokoll untersucht wurden oder bei denen sich in der 2D MR-Bildgebung der Verdacht auf ein neurales Kompressionsyndrom ergeben hatte. Dieses Gesamtkollektiv wurde bezüglich radiologischer Diagnosen, der relativen Häufigkeiten neurovaskulärer Konflikte der Hirnnerven V-VIII und deren Geschlechterverteilung, sowie der Häufigkeit der beteiligten Gefäße untersucht.

Ein Standardakquisitionsprotokoll wurde entwickelt, das mit einer Voxelgröße von $0,5^3 \text{ mm}^3$ sowohl eine hohe Detailauflösung, als auch aufgrund der Voxelisotropie die Voraussetzungen für qualitativ hochwertige 3D-Rekonstruktionen bot. Mit einer Untersuchungszeit von 10:03 min konnten die zeitlichen Vorgaben unterboten werden.

In 10 standardisierten Ansichten der Hirnnerven V-VIII konnten die pathophysiologisch relevanten Strukturen dargestellt werden. Die mittlere Nachverarbeitungszeit betrug für den HN V 13,1 min, für den HN VI 5,6 min und für die HN VII/VIII zusammen 13,7 min pro Seite. Die durchschnittliche Bildqualität wurde insgesamt

mit 4,2 von 5 Punkten und die diagnostische Wertigkeit mit 4,1 von 5 Punkten bewertet. Als methodische Probleme wurden in dem bildqualitativ evaluierten Subkollektiv Akquisitionsartefakte notiert, die typischerweise auf Pulsationen von Gefäßen und des Liquor cerebrospinalis, sowie auf Bewegungen des Patienten zurückzuführen waren. In ca. 14% der untersuchten Patienten erlaubten diese keine hinreichende Bildqualität.

Die Nachverfolgung aller virtuell-zisternoskopisch untersuchten Patienten ergab, das sich bei 85% der verfolgbaren Patienten Konsequenzen bezüglich Diagnose (n=15) und/oder Therapie (n= 16) ergeben hatten.

Neun von 24 nachverfolgbaren Patienten wurden aufgrund klinischer und bildgebender Befunde zu einer neuro-/otochirurgischen Intervention vorgestellt. Zum Abschlusszeitpunkt der vorliegenden Arbeit lag davon bei zwei Patienten ein detaillierter intraoperativer Befund vor, der jeweils weitgehend mit dem VZ Befund übereinstimmte. Bei den restlichen sieben Patienten ist eine Entscheidung über einen operativen Eingriff noch nicht gefallen oder dieser wurde abgelehnt.

Sonstige therapeutische Konsequenzen waren medikamentöser oder strahlenmedizinischer (n=3) Art.

Im Gesamtkollektiv waren neurovaskuläre Konflikte mit Beteiligung des Hirnnerven VIII mit 53% am häufigsten, gefolgt von Konflikten des HN V (31%), des HN VII (8%) und der gemeinsamen Beteiligung der HN VII/VIII (8%).

Das vorgestellte Standardprotokoll scheint für die 3D Visualisierung insbesondere neurovaskulärer Konflikte geeignet zu sein. Wesentliche Probleme stellten Akquisitionsartefakte dar, die durch präzise Lagerung minimierbar sind. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um die virtuell-zisternoskopischen mit den intraoperativen Befunden zu korrelieren, was im Rahmen dieser Arbeit wegen der langen Latenz zwischen Bildgebung und neurochirurgischer Intervention nicht möglich war.

6 Literatur

- [1] Wende, S. und Ciba, K. (1966): [The value of cisternography for the diagnosis of the cerebellopontine angle tumors], *Radiologe* 6 [11], Seite 438-42.
- [2] Wende, S. und Ludecke, B. (1971): Technique and value of gas and Pantopaque cisternography in the diagnosis of cerebello-pontine angle tumours, *Neuroradiology* 2 [1], Seite 24-9.
- [3] Steele, J. R. und Hoffman, J. C. (1981): Brainstem evaluation with CT cisternography, *AJR Am J Roentgenol* 136 [2], Seite 287-92.
- [4] Caillet, H.; Delvalle, A.; Doyon, D.; Sigal, R.; Francke, J. P.; Halimi, P. und Bely, N. (1990): Visibility of cranial nerves at MRI, *J Neuroradiol* 17 [4], Seite 289-302.
- [5] Casselman, J. W.; Kuhweide, R.; Deimling, M.; Ampe, W.; Dehaene, I. und Meeus, L. (1993): Constructive interference in steady state-3DFT MR imaging of the inner ear and cerebellopontine angle, *AJNR Am J Neuroradiol* 14 [1], Seite 47-57.
- [6] Girard, N.; Poncet, M.; Caces, F.; Tallon, Y.; Chays, A.; Martin-Bouyer, P.; Magnan, J. und Raybaud, C. (1997): Three-dimensional MRI of hemifacial spasm with surgical correlation, *Neuroradiology* 39 [1], Seite 46-51.
- [7] Raybaud, C.; Girard, N.; Poncet, M.; Chays, A.; Caces, F. und Magnan, J. (1995): [Current imaging of vasculo-neural conflicts in the cerebellopontine angle], *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)* 116 [2], Seite 99-103.
- [8] Seitz, J.; Held, P.; Strotzer, M.; Volk, M.; Nitz, W. R.; Dorenbeck, U.; Stamat, S. und Feuerbach, S. (2002): MR imaging of cranial nerve lesions using six different high-resolution T1- and T2(*)-weighted 3D and 2D sequences, *Acta Radiol* 43 [4], Seite 349-53.
- [9] Yamakami, I.; Kobayashi, E.; Hirai, S. und Yamaura, A. (2000): Preoperative assessment of trigeminal neuralgia and hemifacial spasm using constructive interference in steady state-three-dimensional Fourier transformation magnetic resonance imaging, *Neurol Med Chir (Tokyo)* 40 [11], Seite 545-55; discussion 555-6.
- [10] Shigematsu, Y.; Korogi, Y.; Hirai, T.; Okuda, T.; Sugahara, T.; Liang, L.; Ge, Y. und Takahashi, M. (1998): III. New developments: 2. Virtual MR endoscopy in the central nervous system, *J Magn Reson Imaging* 8 [2], Seite 289-96.

-
- [11] Shigematsu, Y.; Korogi, Y.; Hirai, T.; Okuda, T.; Ikushima, I.; Sugahara, T.; Liang, L.; Ge, Y. und Takahashi, M. (1998): Virtual MRI endoscopy of the intracranial cerebrospinal fluid spaces, *Neuroradiology* 40 [10], Seite 644-50.
 - [12] Fellner, F.; Blank, M.; Fellner, C.; Bohm-Jurkovic, H.; Bautz, W. und Kalender, W. A. (1998): Virtual cisternoscopy of intracranial vessels: a novel visualization technique using virtual reality, *Magn Reson Imaging* 16 [9], Seite 1013-22.
 - [13] Esfahani, F. und Dolan, K. D. (1989): Air CT cisternography in the diagnosis of vascular loop causing vestibular nerve dysfunction, *AJNR Am J Neuroradiol* 10 [5], Seite 1045-9.
 - [14] Hosoya, T.; Watanabe, N.; Yamaguchi, K.; Saito, S. und Nakai, O. (1995): Three-dimensional-MRI of neurovascular compression in patients with hemifacial spasm, *Neuroradiology* 37 [5], Seite 350-2.
 - [15] Naganawa, S.; Koshikawa, T.; Fukatsu, H.; Ishigaki, T. und Fukuta, T. (2001): MR cisternography of the cerebellopontine angle: comparison of three-dimensional fast asymmetrical spin-echo and three-dimensional constructive interference in the steady-state sequences, *AJNR Am J Neuroradiol* 22 [6], Seite 1179-85.
 - [16] De Ridder, D.; Moller, A.; Verlooy, J.; Cornelissen, M. und De Ridder, L. (2002): Is the root entry/exit zone important in microvascular compression syndromes?, *Neurosurgery* 51 [2], Seite 427-33; discussion 433-4.
 - [17] Calhoun, P. S.; Kuszyk, B. S.; Heath, D. G.; Carley, J. C. und Fishman, E. K. (1999): Three-dimensional volume rendering of spiral CT data: theory and method, *Radiographics* 19 [3], Seite 745-64.
 - [18] Bundesausschuss-der-Ärzte-und-Krankenkassen (2001): Richtlinien über Kriterien zur Qualitätsbeurteilung in der Kernspintomographie gemäß §136 SGB V i.V m. §92 Abs. 1 SGB V, *Dt Ärztebl* 98 [12], Seite A786-95.
 - [19] Doyen, E. (1917): Retro-Gasserian neurotomy of the trigeminal nerve, with the aid of intracranial endoscopy., *Surgical therapeutics and operative techniques*. 1 Seite 599-602, Baillière, Tindall, Cox., London.
 - [20] Magnan, J. und Sanna, M. (1999): *Endoscopy in Neuro - Otology*, Thieme, Stuttgart, New York

-
- [21] Magnan, J.; Chays, A.; Caces, F.; Lepetre, C.; Cohen, J. M.; Belus, J. F. und Bruzzo, M. (1993): [Contribution of endoscopy of the cerebellopontine angle by retrosigmoid approach. Neuroma and vasculo-nervous compression], *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* 110 [5], Seite 259-65.
- [22] Magnan, J.; Chays, A.; Caces, F.; Lepetre-Gillot, C.; Cohen, J. M.; Belus, J. F. und Bruzzo, M. (1994): [Role of endoscopy and vascular decompression in the treatment of hemifacial spasm], *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* 111 [3], Seite 153-60.
- [23] Magnan, J.; Chays, A.; Cohen, J. M.; Caces, F. und Locatelli, P. (1995): Endoscopy of the cerebellopontine angle, *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)* 116 [2], Seite 115-8.
- [24] Magnan, J.; Chays, A.; Lepetre, C.; Pencroffi, E. und Locatelli, P. (1994): Surgical perspectives of endoscopy of the cerebellopontine angle, *Am J Otol* 15 [3], Seite 366-70.
- [25] Resnick, D. K.; Jannetta, P. J.; Bissonnette, D.; Jho, H. D. und Lanzino, G. (1995): Microvascular decompression for glossopharyngeal neuralgia, *Neurosurgery* 36 [1], Seite 64-8; discussion 68-9.
- [26] Barker, F. G., 2nd; Jannetta, P. J.; Bissonette, D. J.; Shields, P. T.; Larkins, M. V. und Jho, H. D. (1995): Microvascular decompression for hemifacial spasm, *J Neurosurg* 82 [2], Seite 201-10.
- [27] Barker, F. G., 2nd; Jannetta, P. J.; Bissonette, D. J.; Larkins, M. V. und Jho, H. D. (1996): The long-term outcome of microvascular decompression for trigeminal neuralgia, *N Engl J Med* 334 [17], Seite 1077-83.
- [28] Ryu, H.; Yamamoto, S.; Sugiyama, K. und Nozue, M. (1998): Neurovascular compression syndrome of the eighth cranial nerve. What are the most reliable diagnostic signs?, *Acta Neurochir (Wien)* 140 [12], Seite 1279-86.
- [29] Moller, M. B.; Moller, A. R.; Jannetta, P. J.; Jho, H. D. und Sekhar, L. N. (1993): Microvascular decompression of the eighth nerve in patients with disabling positional vertigo: selection criteria and operative results in 207 patients, *Acta Neurochir (Wien)* 125 [1-4], Seite 75-82.
- [30] Narai, H.; Manabe, Y.; Deguchi, K.; Iwatsuki, K.; Sakai, K. und Abe, K. (2000): Isolated abducens nerve palsy caused by vascular compression, *Neurology* 55 [3], Seite 453-4.

-
- [31] Katusic, S.; Beard, C. M.; Bergstralh, E. und Kurland, L. T. (1990): Incidence and clinical features of trigeminal neuralgia, Rochester, Minnesota, 1945-1984, *Ann Neurol* 27 [1], Seite 89-95.
- [32] Auger, R. G. und Whisnant, J. P. (1990): Hemifacial spasm in Rochester and Olmsted County, Minnesota, 1960 to 1984, *Arch Neurol* 47 [11], Seite 1233-4.
- [33] Digre, K. und Corbett, J. J. (1988): Hemifacial spasm: differential diagnosis, mechanism, and treatment, *Adv Neurol* 49, Seite 151-76.
- [34] Jannetta, P. J. (1998): Typical or atypical hemifacial spasm, *J Neurosurg* 89 [2], Seite 346-7.
- [35] Moller, M. B. (1988): Controversy in meniere's disease: results of microvascular decompression of the eighth nerve, *Am J Otol* 9 [1], Seite 60-3.
- [36] Czerny, C.; Rand, T.; Gstoeftner, W.; Woelfl, G.; Imhof, H. und Trattinig, S. (1998): MR imaging of the inner ear and cerebellopontine angle: comparison of three-dimensional and two-dimensional sequences, *AJR Am J Roentgenol* 170 [3], Seite 791-6.
- [37] Yousry, I.; Camelio, S.; Schmid, U. D.; Horsfield, M. A.; Wiesmann, M.; Bruckmann, H. und Yousry, T. A. (2000): Visualization of cranial nerves I-XII: value of 3D CISS and T2-weighted FSE sequences, *Eur Radiol* 10 [7], Seite 1061-7.
- [38] Meaney, J. F.; Eldridge, P. R.; Dunn, L. T.; Nixon, T. E.; Whitehouse, G. H. und Miles, J. B. (1995): Demonstration of neurovascular compression in trigeminal neuralgia with magnetic resonance imaging. Comparison with surgical findings in 52 consecutive operative cases, *J Neurosurg* 83 [5], Seite 799-805.
- [39] Ryu, H.; Tanaka, T.; Yamamoto, S.; Uemura, K.; Takehara, Y. und Isoda, H. (1999): Magnetic resonance cisternography used to determine precise topography of the facial nerve and three components of the eighth cranial nerve in the internal auditory canal and cerebellopontine cistern, *J Neurosurg* 90 [4], Seite 624-34.
- [40] Yildirim, T.; Karakurum, B.; Hurcan, C.; Kizilkilic, O.; Yalcin, O.; Karatas, M. und Niron, E.A. (2003): Magnetic resonance angiography in the investigation of hemifacial spasm, *Neuroradiology* 45 (S1), Seite S 82.

-
- [41] Casselman, J. W.; Kuhweide, R.; Dehaene, I.; Ampe, W. und Devlies, F. (1994): Magnetic resonance examination of the inner ear and cerebellopontine angle in patients with vertigo and/or abnormal findings at vestibular testing, *Acta Otolaryngol Suppl* 513, Seite 15-27.
- [42] Klingebiel, R.; Freigang, B.; Bauknecht, H. C.; Thieme, N.; Rogalla, P.; Werbs, M.; Kaschke, O. und Lehmann, R. (2001): [Virtual rendering techniques in otologic imaging], *Laryngorhinootologie* 80 [10], Seite 555-62.
- [43] Meaney, J. F.; Miles, J. B.; Nixon, T. E.; Whitehouse, G. H.; Ballantyne, E. S. und Eldridge, P. R. (1994): Vascular contact with the fifth cranial nerve at the pons in patients with trigeminal neuralgia: detection with 3D FISP imaging, *AJR Am J Roentgenol* 163 [6], Seite 1447-52.
- [44] Hamlyn, P. J. und King, T. T. (1992): Neurovascular compression in trigeminal neuralgia: a clinical and anatomical study, *J Neurosurg* 76 [6], Seite 948-54.
- [45] Boor, S.; Resch, K. M.; Perneczky, A. und Stoeter, P. (1998): Virtual endoscopy (VE) of the basal cisterns: its value in planning the neurosurgical approach, *Minim Invasive Neurosurg* 41 [4], Seite 177-82.
- [46] Klingebiel, R.; Thieme, N.; Werner, J. F.; Werbs, M.; Rogalla, P.; Kivelitz, D.; Kaschke, O. und Lehmann, R. (2001): A post-processing protocol for three-dimensional visualization of the inner ear using the volume-rendering technique based on a standard magnetic resonance imaging protocol, *Acta Otolaryngol* 121 [3], Seite 384-6.
- [47] Botnar, R. M.; Stuber, M.; Kissinger, K. V. und Manning, W. J. (2000): Free-breathing 3D coronary MRA: the impact of "isotropic" image resolution, *J Magn Reson Imaging* 11 [4], Seite 389-93.
- [48] Tomandl, B. F.; Hastreiter, P.; Rezk-Salama, C.; Engel, K.; Ertl, T.; Huk, W. J.; Naraghi, R.; Ganslandt, O.; Nimsy, C. und Eberhardt, K. E. (2001): Local and remote visualization techniques for interactive direct volume rendering in neuroradiology, *Radiographics* 21 [6], Seite 1561-72.
- [49] Heine, C.; Klingebiel, R. und Lehmann, R. (2002): Three-dimensional MR visualization of the intracisternal course of the cranial nerves V-VIII by virtual cisternoscopy, *Acta Radiol* 43 [3], Seite 242-8.
- [50] Boecher Schwarz, H. G.; Bruehl, K.; Kessel, G.; Guenther, M.; Perneczky, A. und Stoeter, P. (1998): Sensitivity and specificity of MRA in the diagnosis

- of neurovascular compression in patients with trigeminal neuralgia. A correlation of MRA and surgical findings, *Neuroradiology* 40 [2], Seite 88-95.
- [51] Mitsuoka, H.; Tsunoda, A.; Okuda, O.; Sato, K. und Makita, J. (1998): Delineation of small nerves and blood vessels with three-dimensional fast spin-echo MR imaging: comparison of presurgical and surgical findings in patients with hemifacial spasm, *AJNR Am J Neuroradiol* 19 [10], Seite 1823-9.
- [52] Ohhashi, G.; Irie, K.; Tani, S.; Ogawa, T.; Abe, T. und Hata, Y. (2001): [Isolated abducens nerve palsy caused by the compression of the basilar artery: a case report], *No To Shinkei* 53 [1], Seite 69-72.
- [53] Ohtsuka, K.; Sone, A.; Igarashi, Y.; Akiba, H. und Sakata, M. (1996): Vascular compressive abducens nerve palsy disclosed by magnetic resonance imaging, *Am J Ophthalmol* 122 [3], Seite 416-9.
- [54] Makins, A. E.; Nikolopoulos, T. P.; Ludman, C. und O'Donoghue, G. M. (1998): Is there a correlation between vascular loops and unilateral auditory symptoms?, *Laryngoscope* 108 [11 Pt 1], Seite 1739-42.
- [55] Ryu, H.; Yamamoto, S. und Miyamoto, T. (1998): Atypical hemifacial spasm, *Acta Neurochir (Wien)* 140 [11], Seite 1173-6.
- [56] Probst, R. (1999): Vestibularisschwannom (Akustikusneurinom) Wandel des Krankheitsbildes und der Therapie?, *HNO* 47 [4], Seite 223-5.
- [57] Berlit, P.; Hufnagel, A.; Meier, U.; Oertel, W.H.; Prange, H.; Reichmann, P.; Rieckmann, C.-W. und Weller, M (2002): Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie, Diener, H.C. und Hacke, W., Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- [58] Jannetta, P. J. (1997): Outcome after microvascular decompression for typical trigeminal neuralgia, hemifacial spasm, tinnitus, disabling positional vertigo, and glossopharyngeal neuralgia (honored guest lecture), *Clin Neurosurg* 44, Seite 331-83.
- [59] Chung, S. S.; Chang, J. H.; Choi, J. Y.; Chang, J. W. und Park, Y. G. (2001): Microvascular decompression for hemifacial spasm: a long-term follow-up of 1,169 consecutive cases, *Stereotact Funct Neurosurg* 77 [1-4], Seite 190-3.
- [60] Sirikci, A.; Bayazit, Y.; Ozer, E.; Ozkur, A.; Adaletli, I.; Cuce, M.A. und Bayram, M. (2003): A new anatomic classification of neurovascular relationship

of the cochleovestibular nerve in patients with neuro-otologic symptoms,
Neuroradiology 45 (S1), Seite S 82.

7 Verzeichnis der Abkürzungen und Fachausdrücke

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AICA	Arteria inferior anterior cerebelli
CT	Computertomographie
DA	Datenakquisition
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DC	Depth Cueing – perspektivischer Lichtabfall
CISS	Constructive interference in steady state
FOV	Field of View
FT	Fourier Transformation
HN	Hirnnerven
HSF	Hemispasmus Facialis
KHBW	Kleinhirn-Brückenwinkel
MAI	Meatus acusticus internus
MIP	Maximum Intensity Projection
MRT	Magnetresonanztomographie
MPR	multiplanare Reformation
MVD	mikrovaskuläre Dekompression
Nn.	Nerven
NV	Nachverarbeitung
NVK	neurovaskulärer Konflikt
PICA	Arteria inferiorposterior cerebelli
Pixel	Picture Element
SCA	Arteria cerebelli superior
SR	Surface Rendering
SSD	Shaded Surface Display
TGN	Trigeminusneuralgie
Voxel	Volume Element
VR	Volume Rendering
VZ	virtuelle Zisternoskopie
WEZ	Wurzeleintritts- bzw. Wurzelaustrittszone

8 Danksagung

Ich danke besonders Herrn PD Dr. med. R. Klingebiel für die engagierte Betreuung und Beratung dieser Arbeit und der daraus entstandenen Veröffentlichung, sowie für die wertvolle Unterstützung bei der Bewältigung technischer und struktureller Probleme, ohne die diese Arbeit undenkbar gewesen wäre.

Für sein Engagement bei der Evaluierung der Hauptstudie danke ich Herrn Prof. Dr. R. Lehmann.

Darüber hinaus danke ich den Probanden, die sich ohne Entschädigung bereit erklärt haben, sich für die technischen Voruntersuchungen zu Verfügung zu stellen. Namentlich seien hier besonders Frau Katrin Feder und Herr Christian Hendel hervorgehoben.

Mein Dank gilt auch Herrn Joachim Jahn für seine kompetente Beratung bei Fragen der digitalen Bildnachbearbeitung und seine Unterstützung bei der Erstellung der Abbildungen des Kapitels „Methoden der dreidimensionalen Datennachverarbeitung“.

Ich widme diese Arbeit meiner Familie, die mir schon im Vorfeld und auch während der Entstehung der Arbeit immer mit Rat und Hilfe zur Seite gestanden hat und die mir Rückhalt und Mut gegeben hat auch schwierige Phasen durchzustehen.

Erklärung an Eides Statt

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation von mir selbst und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst wurde. Sie stellt auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten dar. Die benutzten Hilfsmittel und die Literatur sind vollständig angegeben.

Berlin, den 31. Dezember 2003

Christian Heine